高角度分解能をめざした

多重薄板型X線望遠鏡の開発と性能評価

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻 修士課程 宇宙物理実験研究室

指導教官 石田 学

井上 智暁

2004年1月9日

初めて結像光学系(X線望遠鏡)を搭載した X線天文衛星は、1978年にアメリカが打ち上げた 「*Einstein*」衛星である。この結像光学系を搭載した X線天文衛星の登場は、望遠鏡の能力である高 い角分解能と集光力によって X線天文学に飛躍的な発展をもたらした。角分解能を有することによ り観測対象の天体の位置や空間構造を把握することが可能となり、また集光力の増加と検出器の小型 化によって S/N 比が格段に向上したことで、その検出感度は過去の衛星に比べて 2桁以上向上した。 それ以来、望遠鏡の性能は X線天文衛星の性能を決める重要な要素となっている。

X線望遠鏡の性能を表す指標として、角分解能、有効面積、視野の広さの3項目が上げられる。X線は物質表面にすれすれの角度で入射しないと全反射されないので、X線望遠鏡には極端な斜入射光 学系が必要となる。このため、高い角分解能と広い有効面積を同時に実現するのは困難とされてきた。

1999年にアメリカによって打ち上げられた *Chandra* 衛星は、反射鏡の基板を直接研磨することで 0.5秒角という高い角分解能を得ることが出来た。しかし、基板として用いているガラスの厚さを数 cm 程度必要とするため、開口効率が悪く有効面積を大きくすることができない。

一方、2000年に打ち上げられた X 線天文衛星 Astro-E では、反射鏡の製法に十分滑らかなガラス 表面の形状を基板に写し取るレプリカ法により基板の薄い反射鏡を製作することができ、反射鏡を多 数枚積層することができる。このため、高い開口効率を得ることができるので、口径の小さな望遠鏡 でも効率的に広い有効面積を確保することができる。しかし、薄い基板を使用していることによる鏡 面光軸方向の法線揺らぎの増加や、168 枚積層していることによる反射鏡の位置決定精度が低下によ り、角分解能は光学系の設計値である 19 秒角から 2.1 分角へ低下してしまっている。

本研究では、高い角分解能と開口効率を同時に実現するために、レプリカ法を用いた多重薄板型 X 線望遠鏡の角分解能劣化原因となっている反射鏡鏡面形状誤差と位置決め誤差を同時に補正すること ができる新しい支持方式の研究を行った。その基本方針としては、Astro-E 型の望遠鏡で採用されて いる反射鏡の上下端を動径方向にのびた櫛の歯状のアライメントバーで固定する点支持の方式から、 プレートに切ったスリットに反射鏡を挿入して精度良く加工されたスリット内部の基準面に固定する 面支持の方式へ変更することである。本論文ではこの固定法として、反射鏡背面とスリットの間に弾 性物質を挟み固定する手法とプレートを2枚組にして1枚のプレートをずらし込むことによって反射 鏡を固定する手法の2つを採用し、実際に試作の望遠鏡ハウジングにこれらのプレートと自作した上 下段5組のレプリカ反射鏡を組み込んだ望遠鏡の結像性能を測定した。

まず、弾性体物質によって反射鏡を固定する手法を採用した望遠鏡では、5µmの反射鏡形状誤差を 小さな荷重(3[gw/cm])で補正することができる厚さ 120µmのアルミ基板から作成したレプリカ反 射鏡と7本(Astro-Eでは13本)のアライメントプレートを採用した。その結果は結像性能2.4分角 とAstro-Eにも及ばない結果となった。その原因を探るため詳細なX線測定を行い、原因として弾 性体物質を用いた固定法は定量的に均一な荷重を反射鏡にかけることが困難であったため逆に反射鏡 表面形状を劣化させる結果となっていたことと、厚さ120µmのアルミ基板では剛性が弱くプレート とプレートの間まで補正効果が伝搬していないことが確認された。 そこで、次に基板の剛性をあげるため反射鏡を厚さ 150µm のアルミ基板から作成し、定量的に反 射鏡を基準面に押し付けることができる挟み込みの機構をもつ 2 組のアライメントプレートを 13 組 設計し製作した。そして、この 2 つの変更を加えた望遠鏡の性能測定を行った。まず、レーザー光に よる反射鏡単体での表面形状補正効果の測定では、プレート近傍でもプレート間でも形状を補正でき ていることが確認され、方位角方向への補正効果の伝搬という問題は解決された。最終的に上下段 5 組の反射鏡と 13 組のプレートを望遠鏡ハウジングに組み込み、X 線測定を行った結果、結像性能 1.6 分角という 2005 年打ち上げを予定されている Astro-E2 に搭載される X 線望遠鏡の 1.9 分角を凌ぐ 性能を実現している。

目 次

第1章	序論	10
1.1	X 線天文学	10
1.2	結像性能とX線天文学	10
第2章	X 線光学	13
2.1	反射の原理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
	2.1.1 トムソン散乱	13
	2.1.2 X 線の全反射	15
2.2	表面粗さに対する X 線の反射率と散乱	18
	2.2.1 運動学的回折理論	18
	2.2.2 表面上の粗さによる反射率の低下	21
	2.2.3 散乱 X 線の強度	22
2.3	結像光学系	24
	2.3.1 結像の基本条件	24
	2.3.2 斜入射光学系	26
第3章	これまでの X 線望遠鏡と結像性能向上への指針	27
3.1	X 線望遠鏡の種類とその性能	27
	3.1.1 X 線望遠鏡の性能	27
	3.1.2 製作方法と性能	29
3.2	多重薄板型 X 線望遠鏡	31
3.3	多重薄板型望遠鏡の結像性能劣化諸要因・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
	3.3.1 光学系による結像性能	32
	3.3.2 反射鏡の形状誤差	34
	3.3.3 反射鏡の位置決定誤差	39
	3.3.4 結像性能劣化要因の分離	40
3.4	新望遠鏡製作の指針とその目的	40
第4章	反射鏡の表面形状の評価	43
4.1	表面形状の評価	43
4.2	レーザー光による形状測定システムの構築	44
	4.2.1 測定システムの構成	44

	4.2.2 正反射型レーザー変位計	15
	4.2.3 共焦点型レーザー変位計	17
4.3	X線による表面粗さの評価システム	52
	4.3.1 測定装置	52
	4.3.2 測定方法	58
笠┍空		• -1
5 0 早	レプリカ法による口班形反射競衆ドンステムの構築) L 2 1
0.1 E 0)1 20
0.2	区別現 型 (M) 数 (F) · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·)Z 30
	5.2.1 及別現基版の切り山し)Z
	5.2.2 ハウ取り)Z 20
	5.2.5 ローノによる祖风空)Z
)) 2.4
гo	3.2.3 熟成形用アルミ母型C 熟成形後のアルミ基似の衣面形仏 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·)4 20
0.5		
	0.3.1 マノトレルの元伊 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·)9 70
	$3.3.2$ 並の成族 \ldots	1 U 7 1
F 4	3.3.3 カラスマントレルの形状別と	/ 1 70
5.4	アルミ基 (1) と (1) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2) (2	(Z 70
	5.4.1 エハキシ ll h の 嗅務	(2 75
		15 70
5.5		(6 70
FO	5.5.1 刻離	(6 70
5.0		(6 70
	5.6.1 レーサー光による反射鏡の表面形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(b 77
	5.6.2 A 線による反射鏡の衣面相さ	[]]
第6章	$120 \mu m$ 反射鏡を用いた X 線望遠鏡の光学測定 7	'9
6.1	$120 \mu m$ 反射鏡を用いた X 線望遠鏡	79
	6.1.1 X線望遠鏡ハウジングの試作	79
	6.1.2 測定目的	79
6.2	結像性能の定義と評価方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
6.3		32
	6.3.1 可視光による X 線望遠鏡性能評価	32
6.4	X 線測定	34
	6.4.1 X線測定システム	34
6.5	測定方法	97
	6.5.1 Quadrant 全面スキャン	97

	6.5.2 ポインティングスキャン 98
6.6	X 線による望遠鏡性能評価
	6.6.1 焦点距離
	6.6.2 Quadrant 単位での結像性能測定結果
	6.6.3 各反射鏡の結像性能
第7章	$150 \mu m$ 反射鏡を用いた X 線望遠鏡の光学測定 115
7.1	測定目的
7.2	レーザー変位計による反射鏡方位角方向への補正効果の伝搬の評価115
7.3	可視光測定
	7.3.1 焦点距離
	7.3.2 結像性能
7.4	X 線測定による望遠鏡性能評価119
	7.4.1 焦点距離
	7.4.2 Quadrant 単位での結像性能測定結果
	7.4.3 各反射鏡の結像性能
笋♀咅	キレめレヘ後の钾野 191
퐈 0 早	よこのこう後の読題 131
8.1	まとめ
8.2	今後の課題

図目次

1.1	X 線天文衛星の性能の変遷	12
2.1	電子によるトムソン散乱の散乱角依存性	14
2.2	金の複素原子散乱因子と光学定数	15
2.3	プラチナの複素原子散乱因子と光学定数	16
2.4	単層膜の理論反射率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
2.5	原子散乱因子 f1,f2 の原子量と入射 X 線エネルギーに対しての値	19
2.6	大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱	20
2.7	物質表面による X 線の散乱	20
2.8	粗さのある物質面上での散乱と反射...............................	20
2.9	回折格子による X 線の散乱	24
2.10	アッベの正弦条件....................................	25
2.11	X線で用いられる結像光学系	26
0.1		~ -
3.1		27
3.2	様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積	29
3.3	Vignetting による光軸外の光に対する集光力 (有効面積)の低下	30
3.4	ASTRO-E XRT の概観	32
3.5	ASTRO-E XRT Quadrant の概観	34
3.6	${ m Quadrant} {m {m o}}$ 段面図 — (2段の鏡面の上下端がアライメントバーにより位置決めされている。 なお、	
	1 段目をプライマリー、2 段めをセカンダリーと呼ぶ。)	35
3.7	ASTRO-E XRT-I quadrantの設計図	36
3.8	(左):可干渉距離より小さいスケールの凸凹による散乱(右):可干渉距離より大きい	
	スケールでの法線揺らぎによる反射 X 線の広がり	37
3.9	光軸回りの (方位角方向の) 形状誤差による結像性能の劣化	38
3.10	鏡面の位置決定誤差による結像性能の低下—(分かりやすさのため、1回反射の場合を書いた。)	39
3.11	結像性能劣化の要因・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
3.12	支持方法の検討	42
4.1		45
4.2	ステージの揺らぎ....................................	46
4.3	レーザー変位計の測定原理	46

4.4	測定精度	48
4.5	再現性	48
4.6	共焦点型レーザー変位計を用いた時の測定精度	49
4.7	共焦点型レーザー変位計を用いた時の再現性	49
4.8	速度の違いによる表面形状の見え方・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
4.9	速度の違いによる測定誤差.................................	50
4.10	定点測定	51
4.11	5m ビームライン	53
4.12	チェンバー	53
4.13	5m ビームライン模式図	54
4.14	ターゲットの断面図	55
4.15	ターゲット写真	55
4.16	5m ビームラインチャンバー内部	56
4.17	5m ビームライン検出器	58
4.18	5m ビームラインステージ位置	60
• •		
5.1		63
5.2		63
5.3		64
5.4		65
5.5	熱成形前後のアルミ基板表面形状	66
5.6	熱成形後のアルミ基板表面形状	67
5.7	 熱成形後のアルミ基板表面形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	68
5.8	金の成膜....................................	70
5.9	マンドレル表面形状	73
5.10	マンドレル表面形状	74
5.11	エポキシの噴霧	75
5.12	圧着	75
5.13	基板の剥離・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	76
5.14	反射鏡とガラスマンドレル法線揺らぎ相関図	77
5.15	反射鏡の表面粗さ	78
61	120µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡 Quadrant の設計略図	79
6.2	アライメントプレートとゴムフィラーを用いた新望遠鏡	80
6.3	X 線の入射角 (Incident Angle: θ) と方位角 (Azimuthal Angle: ϕ)の定義—(ϕ は図中	20
0.0	のように Quadrant の境界線から 45 °の位置をゼロ占とする。)	81
6.4		83
6.5		83
0.0		50

6.6	X 線望遠鏡の焦点画像	85
6.7	宇宙研標準 X 線光源室に設置された 30m ビームラインの全体図	86
6.8	X 線発生装置の構成図	87
6.9	四極スリットの構成図	88
6.10	大気室チェンバー中のフィルタの配置図― X 線発生装置側から検出器チェンバー側を見た時の	
	様子 (上)、上 (+Z 方向) から見た様子 (下)。	89
6.11	フィルタの透過率....................................	90
6.12	試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図(柴田 1997) — 左が試料室チェン	
	バー内ステージ群で右が検出器チェンバー内ステージ群。	91
6.13	ビームラインにおける真空・排気装置の全体図.................	94
6.14	検出器チェンバー内に設置されている検出器 — 左 (+Dy 側) から順に CaZdTe 検出器、背面	
	照射型 CCD、P.C.。	95
6.15	背面照射型 CCD カメラの原理 $[?]$ — 前面照射型と背面照射型の断面図 (上)、電荷転送の概念図	
	$(F)_{\circ}$	96
6.16	Quadrant の全面スキャン	97
6.17	ラスタースキャン	98
6.18	ポインティングスキャン — 破線はアライメントプレートを表している。またセクターは左から時	
	計まわりに 1,2~6 と ID をつけた。	99
6.19	X 線望遠鏡の焦点距離	100
6.20	円柱形反射鏡を用いた X 線望遠鏡の焦点画像	102
6.21	ゴムフィラ-による支持を行わないX線望遠鏡の焦点画像	103
6.22	ゴムフィラ-による支持を行った X 線望遠鏡の焦点画像	104
6.23	各反射鏡の HPD	106
6.24	各反射鏡の結像中心のばらつき・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	107
6.25	セクター毎の結像中心のばらつき	108
6.26	反射鏡位置決め誤差・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	110
6.27	反射鏡の結像中心を重ねた場合の X 線望遠鏡の焦点画像	111
6.28	各反射鏡の支持の有無による HPD の比較	113
6.29	支持の有無による各反射鏡の結像中心のばらつき	114
7.1	2組のアライメントプレートとニトフロンシートを用いた新望遠鏡	116
7.2	$150 \mu m$ 反射鏡を用いた X 線望遠鏡 Quadrant の設計略図	116
7.3	補正効果の伝搬測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	117
7.4	反射鏡方位角方向への補正効果の伝搬・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118
7.5	可視光測定による焦点距離測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	118
7.6	X 線望遠鏡の焦点画像	119
7.7	X 線望遠鏡の焦点距離	120

7.8	Astro-E2-T2-Q1の焦点画像
7.9	挟み込み支持望遠鏡の焦点画像123
7.10	ポインティングスキャン — 破線はアライメントプレートを表している。またセクターは左から時
	計まわりに $1,2\sim 12$ と ID をつけた。
7.11	各反射鏡の HPD
7.12	各反射鏡の結像中心のばらつき126
7.13	セクター毎の結像中心のばらつき
7.14	反射鏡の結像中心を重ねた場合のX線望遠鏡の焦点画像
7.15	反射鏡位置決め誤差

表目次

2.1	金とプラチナの臨界角・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
3.1	X 線望遠鏡の性能一覧 (NIT:Normal Incidence Telescope)	31
3.2	ASTRO-E XRT の設計パラメータ	33
4.1	レーザー変位計の仕様	47
4.2	並進ステージ移動速度と実効的なスポット径の関係	49
4.3	サンプルチェンバーステージ 各種パラメータ	57
5.1	アライメントプレート溝内の各パラメータ(R100)	62
5.2	熱成形金型表面形状の平均法線揺らぎ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	65
5.3	熱成形前後のアルミ基板母線方向の法線揺らぎ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	66
5.4	ガラスマンドレル表面形状の平均法線揺らぎ	72
5.5	反射鏡の表面粗さ	78
6.1	可視光測定による焦点距離・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	82
6.2	可視光測定による HPD 測定結果	84
6.3	X 線発生装置の仕様	87
6.4	特性 X 線と対応するフィルタの種類	90
6.5	試料室・検出器両チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998) [?]	92
6.6	ガスフロー型比例計数管の仕様	95
6.7	背面照射型 CCD カメラの仕様	96
6.8	X 測定による焦点距離	99
6.9	X 測定による望遠鏡結像性能	101
6.10	反射鏡位置決め誤差(HPD 換算)	109
6.11	各反射鏡単体での HPD[分角]	109
6.12	X 測定によるセクター 3、4、5 での各反射鏡の平均 HPD	112
6.13	支持を行わない場合の反射鏡位置決め誤差(HPD 換算)	112
7.1	支持の有無による反射鏡の法線揺らぎの向上	117
7.2	可視光測定による焦点距離	118
7.3	可視光測定による HPD 測定結果	119
7.4	X 測定による焦点距離	120

7.5	X 測定による望遠鏡結像性能	121
7.6	各反射鏡単体での HPD[分角]	128
7.7	反射鏡位置決め誤差(HPD 換算) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	128
8.1	Astro-E2 と我々が製作した望遠鏡結像性能の比較	132

第1章 序論

1.1 X 線天文学

自分達の住む宇宙の果てがどうなっているのか、また、その形成はどのように為されたのか。これ らを追い求め、理解することが天文学の目的である。そのためには天体の物理状態を知ることが必要 不可欠である。

天体が放つ光即ち電磁波は天体からの多くの情報を持っており、これを観測することで我々は遠方の天体の物理状態を知ることができる。この電磁波は波長によって電波、赤外線、可視光、紫外線、 X線、ガンマ線に分類することができ、X線領域を観測し、X線放射の起源やそのダイナミクスについて研究するのがX線天文学である。では、X線の波長域(0.1~100 keV)の天体からの電磁波を観測することはどのような物理を解明していくことに継るのであろうか。

X線の一つの特徴はエネルギーが高いことである。例えば、可視光と比べるとそのエネルギーは3 桁も高い。これ程の高エネルギーは、1千万度~1億度の高温プラズマ領域や中性子星やブラック ホール近傍の強い重力場、超新星爆発などの強い衝撃波による電子の加速など、物質の極限状態で生 み出される。また、X線はもう一つの特徴として透過率が大きく、これにより、可視光領域では観測 できない暗黒星雲や厚いガス雲の中に隠された天体を観測することが可能である。

しかし、X 線は大気に吸収されてしまうため観測機器を飛翔体に搭載し大気圏外に出て観測する必要がある。このことが X 線天文学を阻み、1962 年のジャッコーニとロッシによるサウンディングロケットを用いた観測が行なわれるまで、太陽起源以外の X 線を観測することはできなかった。しかしそれ以後の気球実験、さらには 1970 年の「*Uhuru*」衛星以降は数々の X 線天文衛星が打ち上げられ、観測が行なわれてきた。その結果現在の観測対象は恒星のコロナから、白色わい星、中性子星、ブラックホール候補天体、活動銀河核などの高密度天体、また超新星残骸、銀河団などの高温プラズマ天体などの多岐にわたる。

さらに、近年では地上の加速器では再現できない高エネルギーを生み出す、X 線放射領域は、高エ ネルギー物理の検証の場として用いられるようになってきている。

1.2 結像性能とX線天文学

天体が放つ X 線の強度は最も明るい X 線天体の1つである蟹星雲からでさえ、1 [photon/cm²/s] しかなく、地上の実験室での X 線強度から数桁から十数桁微弱なものである。観測される典型的な フォトンのカウントレートは 1 [counts/s] 程度であり、このため1つ1つのフォトンについて、その 入射時刻、進行方向、エネルギー等の詳細な情報を測定する。このため1部例外はあるが、X 線天文 衛星には(X線望遠鏡またはコリメーター)+(エネルギー、時間分解能を持つ検出器)という組み 合わせで観測機器が搭載されてきた。

1962年以降、数々のX線天文衛星が打ち上げられ、X線天文学は衛星の技術的進化と共に発展してきた。1970年代前半はコリメータ+ガス比例計数管といった組合せで、主な衛星として、「*Uhuru*」「Ariel = 5」「OSO = 8」「HEAO = 1」がある。この世代の天文衛星は広い有効面積の観測器による検出限界の向上を図り、典型的な感度は1 mClab程度であった。その中でも、スダレコリメータを搭載した「SAS3」は、その位置分解能により、銀河系内にあるX線源の位置を正確に決め、光学天体との同定を行なった。

しかし、1978年に打ち上げられた「*Einstein*」衛星によって X 線天文学は劇的な進化を遂げるこ とになる。これまでのコリメーター + 検出器という組合せでは、検出器の開口面積を大きくすれば目 的の天体からのフォトンを開口面積に比例して多く集めることができるが、それと同時にバックグラ ウンドとなる、宇宙 X 線背景放射(CXB)も同じように増える。さらには、もう1つのバックグラ ウンドである荷電粒子等の宇宙線は、検出器の体積に比例して増えるため、検出器を大きくしても検 出感度には限界があった。これに対して、「*Einstein*」衛星は、X 線望遠鏡 + マイクロチャンネルプ レートという組合せを初めて搭載し、この限界を打ち破ることに成功した。X 線望遠鏡による角分解 能を得ることで目的の天体以外の方向からの X 線を除去でき、さらには小さな開口面積を持った検 出器で多くのフォトンを集めることができるため検出感度(シグナルノイズ比:S/N比)が激的に改 善され、検出感度 0.1 μClabを達成したのである。

さらにその後、X 線望遠鏡は持たないが特徴的な検出器を持つ衛星として、日本の打ち上げた、 9.5%@6keV というこれまでの比例計数管の倍のエネルギー分解能を持つ、蛍光比例計数管を搭載し た「てんま」、低いノイズを持つ 4000*cm*² という大面積の比例計数管を搭載した「ぎんが」などが ある。

X 線望遠鏡を搭載した衛星として登場したのが、3秒角という高い角分解能を持った「*ROSAT*」である。この衛星は望遠鏡を搭載した衛星で初めて全天観測を行ない「*Uhuru*」衛星で観測した X 線 天体の 200 倍以上の 10 万個もの天体を発見することに成功した。さらに、90 時間という長い周期の 軌道を持つため、長時間の観測が可能だった「*EXOSAT*」がある。

また、撮像型蛍光比例計数管と共に、2%@6keVという半導体検出器としては限界に近いエネルギー 分解能を持つX線CCDを初めて焦点面に搭載し、0.1~10 keVのX線領域で世界初の撮像分光観測 を可能にした「あすか」がある。この衛星の登場によって、銀河系中心付近からの蛍光鉄輝線の発見 や超新星残骸や銀河団の重元素組成の測定に基づく、宇宙の化学進化の研究などの天文学上の成果が 得られた。

さらに「*XMM*」「*Chandra*」などといった最新のX線天文衛星では、(秒角単位の角分解能を持つ X線望遠鏡)+(X線CCDとGrating等の分散型高分解能分光素子)という組合せになってきてい る。これにより、離角が秒角程度の重力レンズによるクローバーリーフの発見、Jetの加速機構の解 明などX線天文学上重要な発見が為されている。

一方、我々が打ち上げ予定のASTRO-E2衛星はこれらとは異なり、高い集光力と優れたエネルギー 分解能を持たせるという方向性をとっている。 以上のように、X線天文学はX線天文衛星の技術的進化、特にX線望遠鏡の進化によって大きく 発展してきた。第3章で述べるように、X線望遠鏡は製作方法によって性能に大きく制限がつき、広 いエネルギー帯域で高い集光力を持ち、それと同時に高い分解能を持つことは現段階では不可能であ る。しかし、これを打破することができれば、X線天文学にさらなる発展が望める。そこで、本研究 では高い集光力を保ちつつも、結像性能を秒角単位まで向上させるための基礎開発を行なう。





図 1.1: X 線天文衛星の性能の変遷 (左上:空間分解能、右上:エネルギー分解能、下:検出感度)

第2章 X線光学

X 線のエネルギー帯域では、ほとんどの物質の屈折率が 1 に非常に近く、全反射を得るのが困難である。また、波長にすると $0.1 \text{ }^{A} \sim 100 \text{ }^{A}$ と極めて短いので、反射鏡表面の粗さを非常に滑らかにする必要がある。本章では、このような高エネルギーの X 線の反射の原理と、表面粗さによって生じる X 線の散乱を取り扱う。

2.1 反射の原理

2.1.1 トムソン散乱

物質中を z の距離だけ通過した電磁波の電場に対する波動方程式の一般解は、真空での波長を λ として、複素屈折率 \tilde{n}

$$\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - i\beta(\lambda) \tag{2.1}$$

を用いる事で、

$$E(z,t) = E_0 \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda} \left(\tilde{n}z - ct\right)\right]$$
(2.2)

$$= E_0 \exp\left(-\frac{2\pi\beta}{\lambda}z\right) \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda}\left(nz - ct\right)\right]$$
(2.3)

と書ける。 ここで、 E_0 は z = 0 での電場の振幅である。この式は、第 2 項が物質中での振動を表しており、第 1 項が屈折率の虚数部分 β を消衰係数とした減衰関数となっている。 つまり、 $\mu = 2\pi\beta/\lambda$ とすると、距離 z を通過した波の強度 $I(z) = |E(z)|^2$ はもとの強度 I_0 に対して、

$$I(z) = I_0 \exp(-\mu z)$$
(2.4)

と減衰する事を意味している。 実際は μ の代わりに、これを物質の密度 ρ で割った質量吸収係数 μ_m が使われる事が多い。

X線が物質中に入射すると、ある断面積でもって原子が X線と弾性散乱を起こす。これをトムソン散乱と言うが、簡便のため、まず自由電子によるトムソン散乱を考える。振幅が E_0 である入射 X線の電磁波によって、原子中の束縛電子に双極子的な強制振動を引き起こし、この電子を源として入射 X線と同じ振動数を持つ二次的な X線が放射される。再放射された散乱波は方向依存性をもっており、散乱波の振幅 E_s は、双極子軸と散乱波の進行方向の角度 χ との間に、

$$E_s = \frac{r_e E_0}{r} \sin \chi \tag{2.5}$$

の関係がある (図 2.1)。ここで、r_e は次で定義する電子古典半径である。



図 2.1: 電子によるトムソン散乱の散乱角依存性

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = 2.82 \times 10^{-13} \text{ [cm]}$$
(2.6)

一方、原子核も電荷を持っており、入射 X 線によって振動させられる。しかし、振動とそれによっ て引き起こされる二次的な放射は、荷電粒子が非相対論的運動の場合、加速度に比例するため、電子 に比べ非常に大きな質量を持つ原子核からの再放射は無視することができる。

以上より原子全体での散乱は、自由電子による散乱波の重ね合わせだけで考えれば良いように思え るが、実際の電子は原子核に束縛され、さらに周囲の原子との相互作用があるため、補正が必要とな る。この補正のために原子散乱因子 f を以下のように定義する。

$$f \equiv \frac{1 個の原子によって散乱された波の振幅}{1 個の電子によって散乱された波の振幅} (2.7) = f_1(E,\phi) + i f_2(E,\phi) (2.8)$$

$$= f_1(E,\phi) + i f_2(E,\phi)$$
(2.8)

この補正を加えて原子による散乱振幅 E_sは、

$$E_{s} = f(E,\phi) \times \frac{r_{e}E_{0}}{r} \sin \chi = [f_{1}(E,\phi) + if_{2}(E,\phi)] \times \frac{r_{e}E_{0}}{r} \sin \chi$$
(2.9)

となる。注意しなければならないのは、この f_1, f_2 は入射 X 線のエネルギーだけではなく、散乱 るためであるが、後で扱う内容は散乱角 $\simeq 0$ の場合のみでなので、 $f_1(E,\phi), f_2(E,\phi)$ を、それぞれ $f_1(E,0), f_2(E,0)$ の値で近似できる。

これにより、*f*₁、*f*₂は相対論的量子分散理論で求めることができ、次式のように表すことがで きる。

$$f_1(E,0) = Z + \frac{1}{\pi r_e hc} \int_0^\infty \sigma(W) \frac{W^2}{E^2 - W^2} dW - \Delta_{rel}$$
(2.10)

$$f_2(E,0) = \frac{1}{2\pi r_e hc} E\sigma(E)$$
(2.11)

 f_1 の第1項は原子中の電子数を表し、第2項は異常分散の効果を表している。第3項は相対論的補 正項で X 線領域では無視できる。 よって、吸収端から離れたところでは $f_1 = Z$ と近似できる。ま た、 f_2 は原子による光電吸収を表す因子である。

原子散乱因子 f_1 、 f_2 は物質の屈折率 n や吸収係数 β と

$$\delta = 1 - n = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_1 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_1$$
(2.12)

$$\beta = \frac{e^2 \hbar^2}{2\epsilon_0 m_e E^2} f_2 = \frac{N_a r_e}{2\pi} \lambda^2 f_2 = \frac{\lambda}{4\pi} \mu = \frac{\rho \lambda}{4\pi} \mu_m$$
(2.13)

の関係がある。ただし $N_a = (N_0/A) \rho^1$ とする。



図 2.2: 金の複素原子散乱因子と光学定数

(図左は金の複素原子散乱因子 f_1 、 f_2 、図右は金の密度を 19.32 $[g/cm^3]$ としたときの光学定数 δ 、 β である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

2.1.2 X線の全反射

図 2.2、2.3 より物質の屈折率が 1 よりわずかに小さいことが分かる。これにより、X 線が物質表面 に臨界角 θ_c よりも小さい角度で入射すれば全反射を得る事ができる。

ここで、真空中から物質(屈折率 \tilde{n})にX線が入射した場合を考える。それぞれ表面から測った入射角、屈折角を θ_i 、 θ_r とすると、 θ_i 、 θ_r には、スネルの法則により、

$$\cos\theta_i = \tilde{n}\cos\theta_r \tag{2.14}$$

の関係がある。 $\theta_r = 0$ の時の θ_i が θ_c であるから、吸収を無視 ($\beta = 0$) すると、

 $^{^{1}}N_{0}$ はアボガドロ数、Aは原子質量数、 ρ は原子密度である。



図 2.3: プラチナの複素原子散乱因子と光学定数

(図左はプラチナの複素原子散乱因子 f_1 、 f_2 、図右はプラチナの密度を 21.45 [g/cm³] としたときの光学定数 δ 、 β である。両図とも横軸にエネルギーをとる。)

$$\cos\theta_c = \tilde{n} \simeq 1 - \delta \tag{2.15}$$

となる。さらに、図 2.2、2.3 で示したように、 $\delta \ll 1$ であるから、 $\theta_c \ll 1$ [rad] である。そこで、 $\cos \theta_i \simeq 1 - \frac{\theta_c^2}{2}$ の近似を用いると、

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \tag{2.16}$$

となる。

よって (2.12) 式より、 ρ [g/cm³]、E [keV]、 λ [nm] を用いて θ_c は、

$$\theta_c = 1.332 \times 10^{-2} \left(\frac{\rho f_1}{A}\right)^{1/2} \lambda \text{ [deg]}$$
(2.17)

$$= 1.651 \times 10^{-2} \left(\frac{\rho f_1}{A}\right)^{1/2} \frac{1}{E} \, [\text{deg}]$$
(2.18)

と書ける。

(2.10)式は吸収端から十分離れたところでは $f_1 \sim Z$ である事を示し、重元素の場合 $Z/A \sim 0.5$ であるから、(2.16)式は結局

$$\theta_c \propto \sqrt{\rho} \,\lambda$$
 (2.19)

と求まる。 このため後にも述べるが、反射面にはしばしば密度の大きな物質である金や白金が用い られる。 真空から複素屈折率 \tilde{n} を持つ物質に X 線が入射した場合、界面に平行な電場ベクトルを持つ P 偏 光と、垂直な電場ベクトルを持つ S 偏光に対する反射振幅 r_p 、 r_s は、E と H の境界条件よりフレネ ルの式から、

$$r_p = \frac{\sin \theta_r - \tilde{n} \sin \theta_i}{\sin \theta_r + \tilde{n} \sin \theta_i}, \qquad r_s = \frac{\sin \theta_i - \tilde{n} \sin \theta_r}{\sin \theta_i + \tilde{n} \sin \theta_r}$$
(2.20)

である。反射強度はそれぞれの偏光につき複素共役との積をとり、

$$R_p = r_p r_p^*, \qquad R_s = r_s r_s^* \tag{2.21}$$

と書ける。 全反射の様な極端な斜入射では、反射率はほとんど偏光に依らない。よって反射率は、

$$R_0 = \frac{R_p + R_s}{2}$$
(2.22)

と考えて良い。したがって反射率は臨界角 θ_c で規格化すると、

$$R_{0} = \frac{h - \frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\sqrt{2(h-1)}}{h + \frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\sqrt{2(h-1)}}$$

$$h = \left(\frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\right)^{2} + \sqrt{\left(\left(\frac{\theta_{i}}{\theta_{c}}\right)^{2} - 1\right)^{2} + \left(\frac{\beta}{\delta}\right)^{2}}$$

$$(2.23)$$

となる。

図 2.4 に (2.23) 式を用いて計算した、真空と物質の界面での X 線の反射率計算結果を示す。横軸は 臨界角で規格化した入射角である。このように、反射率は $\theta_i/\theta_c = 1$ 以下の全反射領域でのみ高く、 臨界角を超えると急速に減衰する。 また X 線の吸収が少ないとき ($\beta/\delta = 0$)、全反射領域 ($\theta_i/\theta_c = 1$ 以下) での反射率は 100 % であるが、吸収が大きくなる (すなわち β/δ の値が大きくなる) にしたがっ て全反射領域の反射率が低下することが分かる。したがって、反射物質には、密度が大きく、 β/δ が 小さい、物理的、化学的に安定な物質である金や白金が有用である。

実際の反射率は、Henke テーブルなどの f₁, f₂の値を用いて計算を行なう。Henke テーブルの原子 番号と入射 X 線エネルギーに対しての値を図 2.5 に図示した。

物質	原子番号	原子量	密度 $[g/cm^3]$	Al-K α	$\mathrm{Cu}\text{-}\mathrm{K}\alpha$
Pt	78	195.08	21.45	2.64°	0.58°
Au	79	196.97	19.32	2.52°	0.56°

表 2.1: 金とプラチナの臨界角



図 2.4: 単層膜の理論反射率

2.2 表面粗さに対する X 線の反射率と散乱

2.2.1 運動学的回折理論

ここでは運動学的回折理論を基に議論を進めていく。

有限の大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱を考える。物質表面による散乱はボルンの第 一近似²が適用できるので、物質からの散乱波の振幅は各原子による散乱波の振幅を、電子の位置に よる位相のずれを考慮して重ね合わせたものとなる。

入射波と散乱波の波数ベクトルをそれぞれ \mathbf{k}_{0} として、散乱ベクトル q を

$$\mathbf{q} = \mathbf{k} - \mathbf{k}_0 \tag{2.24}$$

と定義する。この大きさは、

$$|\mathbf{q}| = q = \frac{4\pi \sin \theta}{\lambda} \tag{2.25}$$

である。但し、 2θ は k と k₀ のなす角である。

すると点 P からの散乱波は、原点からの散乱波との間に位相差 $(\mathbf{k}-\mathbf{k}_0)\cdot\mathbf{r}(=\mathbf{q}\cdot\mathbf{r})$ を生ずる。ここで 位置 r での原子の数密度を $\rho(\mathbf{r})$ とすると、微小体積要素 $d\mathbf{r}$ で散乱される波の振幅は、 $\rho(\mathbf{r})\exp(i\mathbf{q}\mathbf{r})d\mathbf{r}$ に比例する。したがって、強度 I_0 の X 線が入射した場合の散乱体全体からの散乱波の強度は、

$$S(\mathbf{q}) \equiv N \int \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{U} \boldsymbol{\tau}, \qquad (2.26)$$

²物質中で X 線が 1 回しか散乱されないときに使用できる近似で、物質と X 線との相互作用が十分小さい時に適用できる。



図 2.5: 原子散乱因子 f1,f2の原子量と入射 X 線エネルギーに対しての値

$$I = I_0 f^2 |S(\mathbf{q})|^2 \quad (f : \mathbf{\bar{R}} \neq \mathbf{\bar{n}} \mathsf{L} \mathsf{B} \neq \mathbf{\bar{N}}$$
(2.27)

となる。 これは、散乱体が固体、液体、気体でも適用できる一般的な式で、運動学的回折理論の基 礎を与える式である。

次に図 2.7 のような物質表面での X 線の散乱を考える。粗さのある平面を考えた時に、図 2.8 のように、平均の表面に x, y 軸を、それに垂直に z 軸を定義する。これから q のそれぞれの方向に対する 成分は、xz 面内から X 線が入射したとし、図 2.7 で定義する角度を用いると、

 $\mathbf{q}(q_x,q_y,q_z)$ の成分はそれぞれ、

$$q_x = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i - \cos \theta_s \cos \phi)$$

$$q_y = \frac{2\pi}{\lambda} (-\cos \theta_s \sin \phi)$$

$$q_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_i + \sin \theta)$$
(2.28)



図 2.6: 大きさをもつ物質による X 線のトムソン散乱



図 2.7:物質表面による X 線の散乱

となる。ここで、物質表面上での反射に運動学的回折理論を適用し、(2.23)式の R₀を用いることで 反射 X 線の強度は、



図 2.8: 粗さのある物質面上での散乱と反射

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A dx dy \, \exp[-iq_z Z(x, y)] \exp[-i(q_x x + q_y y)] \right|^2$$
(2.29)

と導ける (AはX線があたっている領域)。

2.2.2 表面上の粗さによる反射率の低下

ここでは、 $q_z Z(x,y) \ll 1$ となるような滑らかな平面上での正反射³(以後、「反射」とは正反射 X 線 で、「散乱」とは正反射以外の方向へ進む X 線とする。)の反射強度について考える。

まず、 $q_z Z(x,y) \ll 1$ により $q_z Z(x,y)$ を含むエクスポネンシャルを 2 次の項まで展開し、

$$\exp(-iq_z Z(x,y)) \simeq 1 - iq_z Z(x,y) - \frac{1}{2!}(q_z Z(x,y))^2$$
 (2.30)

ここで第2項は大角度への散乱を表す項であるので、今のように非常に滑らかな平面では無視できる。そこで、さらに

$$\simeq \exp(-\frac{1}{2}(q_z Z(x,y))^2)$$
 (2.31)

と近似できる。正反射では、 $\theta_i = \theta_s, \phi = 0$ であるので、 $q_x = q_y = 0, q_z = 2\sin\theta_i$ となり、(2.29)式にあてはめると、

$$I = I_0 R_0 \left| \frac{1}{A} \int_A \exp(-iq_z Z(x, y)) dx dy \right|^2$$
(2.32)

$$\simeq I_0 R_0 \left(\exp(\frac{1}{2} (q_z Z(x, y))^2) \frac{1}{A} \int_A Z(x, y)^2 dx dy \right)^2$$
(2.33)

ここで、表面粗さ σ を考えると、 $\frac{1}{A}\int_A Z(x,y)^2 dx dy = \sigma^2$ であるので、

$$I = I_0 R_0 \left(\exp\left(-\frac{1}{2}(q_z \sigma)^2\right) \right)^2$$
(2.34)

$$= I_0 R_0 \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta_i}{\lambda}\right)^2\right)$$
(2.35)

と書き直せる。(2.34)式の R_0 にかかる項は Debye-Waller 因子⁴と呼ばれる。この、フレネルの反射 率 R_0 に Debye-Waller 因子をかけたものは、特に $q_z Z(x,y) \ll 1$ となる条件では実験結果を非常によ く再現している。

Debye-Waller 因子を見ると、波長の-2 乗に比例して減衰効果が大きくなることが分かる。X 線領域(波長が 0.1~100Å)の様に非常に短かな波長域では、可視光光学系のような直入射光学系を用い

³平均の法線方向に垂直な面に対しての入射角 θ_i と散乱角 θ_s が等しい場合にその X 線を正反射光、その散乱角を正反 射な方向という。

⁴Debye-Waller 因子は、本来は結晶中の原子位置の熱運動による揺らぎを考慮に入れるために導入された。

ると⁵、数 A 程度の粗さで反射率が大きく低下してしまう。しかし、ASTRO-E XRT 等では極端な斜入射光学系を用いているため、 $\sin \theta_i$ の効果の分 σ の値が数 A まで観測に十分な反射率を得ることができる。

2.2.3 散乱 X 線の強度

次に、X線の散乱(正反射でない散乱成分)について議論する。散乱については、いくつかの理論 があるが、q_z·zの小さい場合のみに適用できるものがほとんどである。

ここではそれらのうち、代表的な2つの理論について述べる。

Plain-Wave Born Approximation : PWBA [5]

まず (2.29) 式を、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dx dy \frac{1}{A} \int_A dx' dy' \exp\left(\left(-iq(Z(x,y) - Z(x',y'))\right) \times \exp\left(-i(q_x(x-x') + q_y(y-y'))\right)\right)$$
(2.36)

と変形する。 ここで相対座標 $(X,Y) \equiv (x'-x,y'-y)$ を導入し、g(X,Y)を

$$g(X,Y) \equiv \left\langle (z(x',y') - z(x,y))^2 \right\rangle$$
(2.37)

と定義する。 ここで、g(X,Y) は $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$ の距離だけ離れた 2 点間の粗さを表しているが、 $R \to \infty$ のときには g(X,Y) は無限大にはならないはずである。(さもなければ、 $R \to \infty$ のときは反射率が 0 となってしまう。) よって、適当なカットオフ ξ をつけ、例えば、

$$g(R) = 2\sigma^2 \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{R}{\xi}\right)^{2h}\right) \right)$$
(2.38)

とし、g(X,Y)を適当な値 $2\sigma^2$ に収束させるようにする。

ここでさらに、(z(x',y') - z(x,y))がガウス分布をすると仮定すると、(2.36)式は、

$$I = I_0 R_0 \frac{1}{A} \int_A dX dY \exp\left(-\frac{q_z^2 g(X, Y)}{2}\right) \exp\left(-i(q_x X + q_y Y)\right)$$
(2.39)

と書き直せる。

さらに、correlation function C(X, Y)

$$C(X,Y) \equiv \left\langle z(x',y')z(x,y)\right\rangle = \sigma^2 - \frac{1}{2}g(X,Y)$$
(2.40)

⁵2.1 と矛盾しているように思われるかも知れないが、X線領域でも Bragg 反射を用いた多層膜ミラーによる直入射鏡 が可能である。

を定義することにより、(2.39)式を

$$I = I_0 R_0 \exp(-g_z^2 \sigma^2) \frac{1}{A} \int dX dY \exp(q_z^2 C(X, Y)) \exp(-i(q_x X + q_y Y))$$
(2.41)

と書き直す。 ここで $F(q_z, R) \equiv \exp(q_z C(X, Y)) - 1$ とすると、 $R \to \infty$ では $F \to 0$ となるため、 (2.41) 式を正反射成分と散乱成分に分けることができる⁶。

よって、 $I = I_{spec} + I_{diff}$ を分けて表記すると、

$$I_{spec} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \delta(q_x) \delta(q_y)$$
(2.42)

$$I_{diff} = I_0 R_0 \exp(-q_z^2 \sigma^2) \frac{1}{2} \int_0^\infty dR R F(q_z, R) J_0(q_z, R)$$
(2.43)

となり、(2.42) 式は、(2.34) 式と一致していることが分かる。 これは正反射成分と散乱成分の反射 強度を同時に得ることができ、*qz*σ が小さい場合には、比較的実験結果を再現している。ただし、 (2.38) 式が物質の表面状態をあたえるわけであるが、これが形状測定の結果と一致しないことも多 く、問題点も多い。最近では粗さが比較的大きい表面に対しても適用できる、Distorted-Wave Born Approximation(ひずみ波 Born 近似): DWBA がよく使われている。

bidirectional reflectivity distribution Function : BDRF [3] [4]

この理論は正反射でない散乱成分のみを取り扱うため、(2.29)式とは考え方を異にする。

まず物質表面を表面波長 l が連続的に変化する正弦波の重ね合わせと考え、入射 X 線は表面のその 多数の回折格子 (図 2.9) によって散乱させると考える。但し、回折格子による回折光は 0 次及び 1 次 が支配的であるため、回折条件の式

$$m\lambda = l(\cos\theta_i - \cos\theta_s) \tag{2.44}$$

での m = 1の回折光のみについて考える。

ここで、表面上の凸凹を表す関数として、Power Spectral Density(PSD) 関数を導入する。表面上の 点 (x,y)における凹凸の高さを (Z(x,y))とすると、その PSD 関数はフーリエ成分の 2 乗として表せ、

$$PSD_2(f_x, f_y) = \frac{1}{A} \left| \int_0^A \exp(2\pi i (f_x x + f_y y)) Z(x, y) dx dy \right|^2$$
(2.45)

の式で与えることで、回折格子による θ_s への 1 次の散乱強度は、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_2(f_x, f_y)$$
(2.46)

⁶無限大の平面上に光があたっている場合には散乱は0になるはずであるため



図 2.9: 回折格子による X 線の散乱

と与えられる。 ここで、 λ^4 はレイリーの blue-sky 因子、sin の項は幾何学的効果、 $R(\theta)$ は (2.23) 式 の $R_0(\theta)$ である。この項は臨界角付近の散乱強度の急激な変化 (Yoneda 効果) を補正するために導入 してある。

注意すべき点は、BDRF は (2.29) 式での、z 方向の変位による位相の変化 $\exp(-iq_z Z(x,y))$ をこの式では考慮していない。よって、当然ながら $q_z Z(x,y) \ll 1$ となる非常に滑らかな面内にのみ適用できる。

実際のX線散乱測定では1次元のみの測定が普通であるので1次元の式を与えると、

$$\frac{dI}{d\theta_s} = I_0 \frac{\pi}{\lambda} \sin \theta_i \sin^2 \theta_s \sqrt{R(\theta_i)R(\theta_s)} PSD_1(f_x)$$
(2.47)

但し、
$$PSD_1(f_x) = \frac{1}{L} \left| \int_0^L \exp(2\pi i f_x x) Z(x) \right|^2$$
 (2.48)

となる。

2.3 結像光学系

2.3.1 結像の基本条件

望遠鏡に対する結像の条件には以下のものがある。

- 1. 光軸に平行な光が1点に集光すること。
- 物体から焦点までに至る全ての光路差が観測する波長の4分の1以下であること(レイリーの 1/4 波長条件)。これは言い替えれば、直入射光学系における1回反射であれば、鏡面の形状精 度が波長の8分の1以下に収まっているということである。

ただし、X線領域では電磁波が互い干渉する空間的範囲(空間的コヒーレンスが保たれる範囲) が非常に狭いため、およそ1[mm]以内の鏡面上の範囲でこれが成り立っていれば良い。 3. 光軸上の物点 O から光学素子の任意の点を見込む角を *u*、同様に光軸上の焦点 I から見込む角 を *u*'とした時 (図 2.10)、アッベの正弦条件

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \text{const.} \tag{2.49}$$

が成り立つこと。 これは光軸周辺に広がった観測対象がある場合に、像に歪みがなく結像する ための条件である。

X線領域では、この様な条件を満たす結像光学系として、ゾーンプレートや X線レンズ、軟 X線用 直入射式多層膜反射鏡の他、斜入射光学系が挙げられる。X線天文衛星では、このうち斜入射光学系 が用いられることが一般的である。



図 2.10: アッベの正弦条件

2.3.2 斜入射光学系

2.1 で述べたように、X 線領域では有効な反射を得るためには極端な斜入射を用いなければならない。しかし、直入射鏡で良く用いられる凹面の球面鏡は、斜入射で用いれば非点収差が大きくなり、高い結像性能は得られない。また、一方で平行光を完全に点に集光することができる回転放物面鏡 も、斜入射光学系で用いると、広がった光源からの光に対してはコマ収差が急激に増大し、良好な結 像性能を得ることはできない。

このコマ収差を解決するために、2枚の反射面を組み合わせて収差を抑える方法が一般に用いられている[1]。この様な光学系を用いた代表的な例として、2種類の回転2次曲面を組み合わせた Wolter型反射鏡[2]が挙げられる。これはさらに反射鏡の組合せによって、凹面と凹面を組み合わせたI型、凹面と凸面を組み合わせたII型、凸面と凹面を組み合わせたIII型に分けることができる。

このうち、望遠鏡の光学系としてよく用いられる I 型と II 型は、回転放物面と回転双曲面を組み合わせたもので、焦点距離の短い I 型が主に採用されているが、II 型も多層膜反射鏡での視野を広げるために極端紫外用の望遠鏡等で用いられる。



図 2.11: (左):回転放物面反射鏡、(右):WolterI型反射鏡

第3章 これまでのX線望遠鏡と結像性能向上への指針

ここでは、2.3で述べた斜入射光学系を用いた X 線望遠鏡に焦点を絞り、その性能等について Astro-E2 搭載用の望遠鏡を中心に議論する。

3.1 X線望遠鏡の種類とその性能

X線望遠鏡には斜入射光学系を用い、さらに主鏡が1枚ではなく同心円状に多数の反射鏡を配置した形状をとる(図3.1)。この様な形状を持つものの内、特に反射鏡が薄く、非常に多数積層したものを多重薄板型X線望遠鏡と呼び、Astro-Eなどはこのタイプの望遠鏡を搭載している。望遠鏡の性能は反射鏡の製作方法や用いる光学系によって大きく異なってくる。

ここでは、X線望遠鏡の種類とその性能について述べる。



図 3.1: X 線望遠鏡の断面図— (複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I)X 線望遠鏡の 断面図)

3.1.1 X線望遠鏡の性能

望遠鏡の性能を定量的に示す指標として、集光力、解像力と視野がある。ここでは、これら3つの 指標について以下に簡単にまとめる。 集光力(有効面積) X線望遠鏡の集光力は、光軸方向から見た反射面の面積(開口面積)に、反射 率を掛けた有効面積と呼ばれる量で表す。すなわち、有効面積 *S_{eff}* は次の式で表すことができる。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E)$$
(3.1)

ここで、 $S(\theta)$ は一段目の反射鏡に入射角が $\theta \sim \theta + d\theta$ の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$ は入射角 θ , エネルギー Eの時の鏡面の反射率である。

ここで、集光力を増大させるためには、光学望遠鏡の様に、焦点距離を一定にして口径を大きくし ただけでは、図 3.1 を見ても分かるように、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が 落ち実質的な光量の増加は望めない。 つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口 径を大きくすれば、それ以上口径を大きくしても有効面積が増えることはない。

そこで、望遠鏡の口径とともに重要となるのが、口径内に占める反射面の割合(開口効率)である。 開口効率を上げるためには、図 3.1 を見れば明らかなように、鏡面基盤の厚さをできるだけ薄くし積 層枚数を上げればよい。

様々な衛星の有効面積の比較を図 3.2 に示す。

解像力(角分解能) 平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、集光・結像したときの焦点面像の広がり で解像力が決まる。 理想的な Wolter-I 型光学系による焦点面像は点になるが、実際は 3.3.2 で述べる ように、回転放物面と回転双曲面を円錐で近似したことや、鏡面の形状誤差などにより、焦点面像は 広がりを持つ。 この広がりは、斜入射光学系では直入射光学系と異なり、円形開口の場合には焦点 面に $1/\theta$ (θ =反射光の拡散角)の関数形となる非常に鋭いピークを持つ。 これを簡単に説明する。反 射鏡の法線ベクトルの揺らぎを $d\theta$ とすると、X 線望遠鏡の半径 R の位置に入射した X 線は、その反 射鏡の法線揺らぎにしたがって焦点からずれた点 (dF_x , dF_y)に到達する。 ここで、焦点距離を FL、 X 方向を R 方向に平行にとると、 dF_x = $2d\theta \times$ FL、 dF_y = $2d\theta \times$ R である。つまり、 dF_x/dF_y =FL/R となる。例えば、ASTRO-E XRT を考えると、FL=4500[mm]、R= $60\sim200$ [mm] であるから、ある 微小領域で反射した X 線がつくる像はその動径方向に $20\sim70$ 倍引き延ばされることとなる。 結局 X 線望遠鏡による像は、この引き延ばされた像を光軸周りに重ね合わせたものであるから、中心部に鋭 いピークを構成することになる。

この様な鋭いピークを持つ関数系に対して、ピークの中心点はいわば特異点であるため、指標に FWHMを用いるのは適切ではない。そこで、解像力を定量的に表すものとしては焦点面上の全強度 の50%が含まれる焦点を中心とした円の直径(Half Power Diameter : HPD)で表す方法がとられる。

視野 斜入射光学系の視野は、収差による結像性能の悪化よりも図 3.3 に示したような、反射鏡面の 遮へい効果 (Vignetting) が大きい。これによる Off-Axis 角 ϕ での有効面積 S_{eff} を非常に簡単に見積 もると、典型的な入射角を θ_i として、

$$S_{eff}(\phi) = S_0(\theta_i - \phi) \qquad (\phi < \theta_i) \tag{3.2}$$

*S*₀:光軸での有効面積



Effective areas of various missions

図 3.2: 様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積(XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積 である。) – AE は ASTRO-E の略である。

となり、Off-Axis $\hat{\mathbf{h}} \phi$ に線形に依存する。

3.1.2 製作方法と性能

2.3 で述べた Wolter-I 型とその近似を実現するための鏡面の製作方法として、現在は直接研磨法と レプリカ法という2つの方法がとられている。3.1.1 で述べたような X 線望遠鏡の性能は、この製作 方法に大きく依存する。

直接研磨法 この方法は一般の光学望遠鏡と同様に、反射面を直接研削、研磨して正確な非球面加工 を行なうものである。 具体的には、ゼロデュアーガラス¹を、小型工具を走査させ部分的に工具の滞 留時間をコンピュータ制御することで、非球面形状に加工する。さらにその表面に金などを蒸着し、

¹熱膨張率が非常に小さく、宇宙空間のような苛酷な状況下でも安定して高分解能の結像性能を保つことができる。



図 3.3: Vignetting による光軸外の光に対する集光力 (有効面積)の低下

反射率を稼ぐ。

この方法で製作された反射鏡は、鏡面を正確に理想二次曲面に加工することができるため非常に高 い結像性能を実現することができる。実際にこの方法で製作した X 線望遠鏡を搭載した *Chandra* で は角分解能 0.5 秒角を達成している。しかし、加工のため基板として用いるガラスの厚さを数 cm 程 度必要とするため開口効率は非常に悪く、またその重量は非常に大きくなり「*Chandra*」では X 線望 遠鏡だけで 1.5ton もの重さになる。

レプリカ法 この方法は表面形状の滑らかなガラス母型に蒸着した金など反射物質を、薄い基盤にその形状を移し取るという方法である。本論文では実際にレプリカ法による反射鏡製作システムを構築 し反射鏡を製作しており、具体的な製作方法については5で述べる。

この方法で製作した反射鏡は、直接研魔法では難しかった非常に薄い基板を用いることができるた め、高い開口効率を非常に軽量で実現することができる。しかし、積層数を増やし開口効率を上げる ためには反射鏡を大量に製作しなければならず、1枚1枚の加工精度を上げることや反射鏡を正確に 配置することが困難になる(3.3.1参照)。そのため、高い結像性能を得ることが難しい。2000に打ち 上げられた Astro-E 衛星に搭載された X 線望遠鏡(XRT)は反射鏡の製作にレプリカ法を採用してお り、この望遠鏡を例にとると *Chandra* 衛星の望遠鏡の 1/3 の口径で同程度の有効面積を非常に軽量 (1台 20 [kg] 程度)で実現することができた。しかし、角分解能は 2.1 分角と大幅に悪くなってしまっ ている。

第3章 これまでのX線望遠鏡と結像性能向上への指針

衛星名	国名	打ち上げ	口径	ミラー長	焦点距離	ネスト数	角分解能	波長域
		(年月)	(cm)	(cm)	(m)	(枚)	(秒角)	(nm)
EINSTEIN	アメリカ	1978.11	60	56	3.4	4	4	6-0.3
EXOSAT	ヨーロッパ	1983.5	28	20	1.1	2	10	10-0.6
ROSAT	ドイツ	1990.6	83	50	2.4	4	3.3	10-0.6
ようこう	日本	1991.8	23	2	1.5	1	2.5	10-0.4
EUVE	アメリカ	1992.6	40	14	0.5	1	4	76 - 5.8
あすか	日本	1993.2	35	10	3.5	120	180	3 - 0.1
ALEXIS	アメリカ	1993.4	$12.8(\mathrm{NIT})$		0.07	1	15	18.6 - 13
SOHO	ヨーロッパ	1995.11	(NIT)			1	1	30.4 - 17
SAX	イタリア	1996.4	15	30	1.8	30	60	10-0.1
Spektr-X	ロシア		60	20	8	154	<120	10-0.1
ABRIXAS	ドイツ				1.6	27	<60	3 - 0.1
Chandra	アメリカ	1999.7	120	84	10	6	0.5	10-0.1
XMM	ヨーロッパ	1999.12	70	30	8	58	15	10-0.1
ASTRO-E	日本	2000.2	40	10	4.75	175	120	10-0.1

表 3.1: X 線望遠鏡の性能一覧 (NIT:Normal Incidence Telescope)

3.2 多重薄板型 X 線望遠鏡

今まで述べてきたように、日本では X 線望遠鏡として多重薄板型 X 線望遠鏡を用いている。実際 に ASTRO-E に搭載された X 線望遠鏡は、図 3.4 のような概観をしており、入射角 0.2~0.7 度の薄 い鏡面基板を持つ反射鏡を同心円状に約 170 枚配置している。このため、10 keV 付近まで大きな有 効面積を有するが、一方で、直接研磨法を用いて製作された望遠鏡に比べ、結像性能は劣り、視野も 狭いという欠点を合わせ持つ。

ASTRO-E では、この様な望遠鏡を5台搭載し、そのうち4台(XRT-I)は鏡面が金でコーティン グされており、焦点面にX線CCDカメラが置かれている。残り1台(XRT-S)はプラチナをコー ティングしており、焦点面にはX線マイクロカロリメータが置かれた。それぞれの詳しい設計パラ メータを表3.2にまとめたが、このパラメータからも反射鏡の構造が非常に密であることが分かる。

ASTRO-E XRT は、その円周方向に対しての4分の1である Quadrant と呼ばれる扇型の構造物 (図 3.5)を4つ組み合わせる形で構成される。Quadrantの中には4分の1周分の鏡面約170枚が、2 段に同心円状に配置され、アライメントバーによって鏡面の上下端は位置決めされている(図 3.6)。

また、アライメントバーを境界線として Quadrant は 14 のセクターと呼ばれる部分に分けられる (図 3.7)。ただし、セクター1とセクター 14 で鏡面は解放端となっており、結像性能が極端に劣るた め金属で覆いおかけておき、観測には使用されない。



Outer Bottom Ring

図 3.4: ASTRO-E XRT の概観

3.3 多重薄板型望遠鏡の結像性能劣化諸要因

入射光の波長に比べ、表面の粗さが無視できる程度に滑らかな鏡面を持つ結像光学系の角分解能 は、入射光の波長を λ 、開口部の直径をDとして、 λ/D に比例する回折限界で決定される。つまり、 波長が短くなるほど小型の望遠鏡で同じ角分解能が得られる訳であるから、可視光より3 ~ 4桁波 長の短いX線では、可視光の直径10 [m] 規模の望遠鏡と同程度の角分解能を、X線では直径1 [cm] の望遠鏡で得られる事になる。

しかし、X線領域では波長は数十Åと非常に短いため、鏡面の加工精度が回折限界よりも先に角 分解能を規定してしまう。さらに、X線領域では極端な斜入射光学系を用いているため、斜入射光学 系特有の非常に大きな収差によって、その角分解能は制限を受ける。

ここでは、上に挙げた望遠鏡の結像性能を低下させる諸要因について詳しく議論する。

3.3.1 光学系による結像性能

Wolter-I型光学系の収差 理想的な Wolter-I型光学系においても、非光軸光に対しては収差が存在し、1点に集光しない。焦点面での像の広がりを HPD で表し、その HPD を *HPD*_{wo} とする。

	XRT-I	XRT-S	XRT-S(spare)		
焦点距離	4750 [mm]	4500 [mm]	4500 [mm]		
焦点面検出器	XIS(X線CCDカメラ)	XRS(カロリメータ)	XRS		
望遠鏡台数	4 台	1 台			
plate scale	0.725 分角 /1 mm	0.763 分角 /1 mm	0.763 分角 /1 mm		
積層数	175 枚	168 枚	168 枚		
入射角度	$0.178 \sim 0.599$ 度	$0.188 \sim 0.639$ 度	$0.188 \sim 0.639$ 度		
反射鏡の積層間隔	$0.488 \sim 1.239 \text{ [mm]}$	$0.506 \sim 1.302 \text{ [mm]}$	$0.506 \sim 1.302 \; [mm]$		
開口面積(1台あたり)	$702 \ [\rm{cm}^2]$	$713 \ [\rm{cm}^2]$	$713 \ [\rm{cm}^2]$		
有効面積 ^{a)} (1.49 keV)	$566 \ [\rm{cm}^2]$	$569 \ [cm^2]$	$583 \ [\rm{cm}^2]$		
(4.51 keV)	$420 \ [\rm{cm}^2]$	$439 \ [\rm{cm}^2]$	$411 \ [cm^2]$		
(8.04 keV)	$340 \ [\rm{cm}^2]$	$344 \ [\rm{cm}^2]$	$300 \ [\rm{cm}^2]$		
(9.44 keV)	$244 \ [\rm{cm}^2]$	$246 \ [cm^2]$	$214 \ [\rm{cm}^2]$		
有効観測エネルギー領域	$\leq 10 \; [\mathrm{keV}]$				
空間分解能($HPD^{b)}$)	~ 2.1 [分角]				
口径	直径 400 [mm]				
反射鏡サイズ	長さ 100[mm]× 厚さ 約	170 $[\mu m]$			
反射鏡の構造	アルミ基板 (157.48 [µm	n] 厚)			
	+ 型取用エポキシ(12.7 [µm] 厚)				
	+金(0.1 [µm]厚XRT-				
	+ プラチナ (0.1 [µm] 厚、XRT-S のみ)				
全重量(1台あたり)	$\sim 18 \; [\mathrm{kg}]$				

表 3.2: ASTRO-E XRT の設計パラメータ

(ASTRO-E XRT の設計パラメータをまとめた。a) 表面が理想的な反射鏡が設計位置にあると仮定したときの計算値。b) 焦点面検出器に来た光子の半数が入る直径。)

焦点面における像の形状はガウス分布で近似できるので、*HPD*_{wo}は、

$$HPD_{\rm wo} = 1.35\,\sigma \,\,[\rm rad] \tag{3.3}$$

$$\sigma \text{ [rad]} = \frac{(\xi+1)}{10} \frac{\tan^2 \theta_i}{\tan \alpha} \left(\frac{L}{F}\right) + 4 \tan \theta_i \tan^2 \alpha \tag{3.4}$$

L:光軸方向への反射鏡の長さ(1段)

F :焦点距離

$$\xi = \alpha_1/\alpha_2$$
: α_1 、 α_2 は1段目、2段目の入射角。ただし殆んどの斜入射望遠鏡で $\xi = 1$
 $\alpha = 1/4 \tan^{-1}(R/F) = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$
 θ_i :入射角と光軸のなす角


図 3.5: ASTRO-E XRT Quadrant の概観

となる。

ここで、ASTRO-EII XRT の設計パラメータから代表的な値である、F =4750 [mm]、L =100 [mm]、 $\alpha = 0.5$ °を代入すると、視野の一番端 (Off-Axis 角:9 分角) で *HPD*_{wo}=2 秒角程度である。

円錐近似 現段階で我々は、鏡面製作の容易さから、Wolter-I型の2次曲面を円錐で近似した反射鏡 を用いている。この近似による像の広がり(*HPD*_{co})は、光軸に平行な入射X線を考えると、

$$HPD_{\rm co} = \frac{L \times \tan(\alpha)}{2F} \tag{3.5}$$

α:入射光と反射面のなす角
 L:光軸方向への反射鏡の長さ(1段)
 F:焦点距離

と表せる。ここで、*HPD*_{wo}を計算した時と同じ ASTRO-EII XRT の設計パラメータを代入すると、 *HPD*_{co}=19 秒角となる。

3.3.2 反射鏡の形状誤差

反射鏡を完全に設計値通りに製作することはできず、様々なスケールで鏡面形状に誤差が生じる。 この誤差による角分解能の劣化は、そのスケールによって波動光学によるものと、幾何光学によるも のに分けられる。



図 3.6: Quadrant の段面図 — (2段の鏡面の上下端がアライメントバーにより位置決めされている。 なお、1段目 をプライマリー、2段めをセカンダリーと呼ぶ。)

波動光学は互いの電磁波が干渉する場合に成り立つが、電磁波が互いに可干渉な距離は有限である。その距離をlとすれば、不確定性原理により入射光の波連の継続時間 Δt と、その振動数 ν を用いたスペクトル幅 $\Delta \nu$ の間に、

$$\Delta t \approx \frac{1}{\Delta \nu} \tag{3.6}$$

が成り立つので、

$$l = c\Delta t \approx \frac{c}{\Delta \nu}$$
 (cは光速度) (3.7)

となる。ここで得られた可干渉距離 *l* は波長と単色度によって変化するが、一般的にはミクロンオー ダーである。

以下では、
しを指標とし、
波動光学、
幾何光学の
両面から
形状
誤差を
議論する。



図 3.7: ASTRO-E XRT-I quadrant の設計図— (ASTRO-E XRT-I quadrant の設計図を簡略化して図示した。 単位は mm。quadrant を上流側(プライマリー)から見た図になっている。フォイルは 10 枚おきに図示した(最後のみ 5 枚)。入射方向から見て反時計回りにアラインメントバー 1~13、セクター 1~14 とする。)

散乱成分 (表面波長 $\leq 0.1 \sim 1 \text{ [mm]}$)

実際の鏡面上には細かな凹凸があり、それによって反射光に位相差が生じる。節 2.3 で述べたよう に、結像するためには反射した X 線の光路差 d_{rough} が入射 X 線の波長 λ の 4 分の 1 以下でなければ ならない。一方、この光路差は、表面粗さの RMS(σ_{rough})、反射面への斜入射角(θ_i)を用いて表す と、ミラーが 2 回反射である事を考慮して、 2 枚の鏡面の粗さが等しいとすると、

$$d_{\rm rough} = 2 \times 2^{\frac{1}{2}} \times \sigma_{\rm rough} \sin \theta_i \tag{3.8}$$

2:反射因子

となる。よって先の条件と合わせて粗さは、

$$\sigma_{\rm rough} < \frac{\lambda}{8} \times \frac{1}{2^{\frac{1}{2}} \sin \theta_i} \tag{3.9}$$

でなければならない。ここで ASTRO-EII XRT の設計パラメータの代表的な値である $\theta_i=0.5$ °と $\lambda=2.1$ [Å] (6[keV]) を代入すると、

$$\sigma_{rough} < 21 \ [\text{Å}] \tag{3.10}$$

となる。このように、斜入射光学系であるため、観測する X 線の波長と比べてかなり大きな粗さまで 鏡面として許されることが分かる。また、実際の鏡面の反射率測定から、Debye-Waller 因子によって 粗さを見積もると、ASTRO-Eの鏡面の場合は $\sigma_{rough} = 4 \sim 5$ [Å] 程度に収まっている。しかし、このような細かな凹凸が l より小さなスケールの範囲で存在すると、波動光学上??節で述べたような散乱を引き起こし、結像性能を劣化させる原因となる。

Specular 反射の光軸方向のスロープ分布(法線揺らぎ) (表面波長 = 0.1~100 [mm])

*l*を越えるスケールの凹凸は幾何光学として考えて良く、平均の法線方向が揺らぐ事によって反射 強度に角度分布が生じる。

鏡面の法線揺らぎの RMS を σ_{slope} とすると、この時の像の広がり(HPD_{slope})は、

$$HPD_{\text{slope}} = 1.34 \times 2 \times 2^{\frac{1}{2}} \times \sigma_{\text{slope}}$$

$$(3.11)$$

2:反射因子

となる。法線揺らぎは鏡面に存在する表面波長のスケールによって異なる。仮に反射鏡光軸方向に 正弦関数的な形状が存在しているとして、表面波長スケールが光軸方向の長さ(100 [mm])と同程度 ならば、表面の凹凸は 2µm 程度で1分角程度の角分解能を実現することができる。しかし、波長ス ケールが1 [mm] 程度まで細かくなると表面の凹凸は 0.03 [µm] 程度でなければならない。



図 3.8: (左): 可干渉距離より小さいスケールの凸凹による散乱 (右): 可干渉距離より大きいスケー ルでの法線揺らぎによる反射 X 線の広がり



図 3.9: 光軸回りの (方位角方向の) 形状誤差による結像性能の劣化

光軸周りの形状誤差 鏡面を光軸周りに見ていくと、各部分で結像位置が異なっている事がある。焦 点位置での像は各部分像の重ね合わせであるから、この結像位置のばらつきが結像性能をさらに劣化 させる。

この光軸周りの形状誤差までを考慮すると、鏡面全体の結像性能(HPD_{total})は、

 HPDaxis
 : 光軸方向のスロープ分布で広がる結像性能 (HPD)

 HPDrot
 : 光軸軸周りの結像のばらつきで広がる結像性能 (HPD)

とすると、

$$HPD_{\text{total}} = \left(HPD_{\text{axis}}^2 + HPD_{\text{rot}}^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(3.12)

となる。

以上のことから X 線望遠鏡の鏡面には、反射率を高めて散乱を抑えるためにミクロンオーダのス ケール(可干渉距離)以内での形状を数 Å まで抑え、光軸方向には鏡面全長の 100 [mm] に渡るよう なスケールでも数 [µm] 以下に揺らぎを抑えるという、厳しい形状精度が要求される。さらに、光軸 周りの方向に対しても数 [µm] 程度の精度が要求される。



図 3.10: 鏡面の位置決定誤差による結像性能の低下— (分かりやすさのため、1回反射の場合を書いた。)

3.3.3 反射鏡の位置決定誤差

斜入射光学系である Wolter-I 型は有効面積を高めるために、焦点位置が等しい多数の反射鏡を同 心円上に配置した形状をとる。そのため、個々の反射鏡の位置決め誤差が望遠鏡全体の結像性能に 関わってくる (図 3.10)。

ASTRO-E 衛星では 2 段の反射鏡の上下端をアライメントバーにより計 4 点で位置決めしている が、そのうちの 1 点が *d_{pos}* だけずれたとすると、反射光の出射方向のずれ *θ_{pos}* は、

$$\theta_{pos} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{d_{pos}}{L} \right) \tag{3.13}$$

2 : 反射因子 L : 光軸方向への反射鏡の長さ(1段)

で与えることができる。

これから ASTRO-E では、位置決めの $1 \pm i 10 \ [\mu m]$ ずれたとすれば、出射角は約 40秒角変化することになる。

3.3.4 結像性能劣化要因の分離

結像性能を決める要因について節 3.3 で詳しく議論したが、実際に望遠鏡ではそれらの要因がどの 程度結像性能の劣化に寄与しているのか知ることは、光学特性の理解と、X 線望遠鏡への改善点を探 るという両方の点で非常に重要である。これらの要因がどの程度望遠鏡の結像性能に影響を与えてい るか明らかにするために、168 枚の反射鏡のうち1 枚のある1部分に X 線ビームを当て、焦点面にお かれた X 線 CCD で焦点面像を撮り X 線像の広がりからフォイルの形状誤差を、また他の反射鏡で も同じようにして測定を行い、それぞれの焦点面像の重心位置の揺らぎから各反射鏡の位置決定誤差 を測定した []hidaka2000]。その結果、結像性能への寄与が図 3.11 の様に分離され、1 分角を切る結 像性能実現のためには、鏡面の位置決定精度はもちろん、鏡面の形状精度をも高める必要があること が明らかになった。



図 3.11: 結像性能劣化の要因

3.4 新望遠鏡製作の指針とその目的

本論文では、高い角分解能と開口効率を同時に実現するために、図 3.11 のようにして得られた結 像性能劣化原因のうち、鏡面位置決め誤差と鏡面形状誤差の補正を試みた。特に鏡面形状誤差の補正 については、反射鏡単体の強度を上げ表面形状を向上させるのではなく、ハウジングに組み込んだの ちに塑性変形を起こさない程度のわずかな圧力を加え、さらに、反射鏡の強度を望遠鏡全体持たせる ことで形状補正を試みており、他に例のない独創的な研究であると言える。現在、X 線望遠鏡に用い られる反射鏡の製作方法は節 3.1 で述べたように、*Chandra* 衛星に代表される反射鏡基板の厚い直接 研磨法と Astro-E 衛星に代表される薄い反射鏡のレプリカ法に大別される。基板が厚いと現状ではこ れ以上開口効率をあげることは難しく、高い角分解能と開口効率を同時に実現するためには、多重薄 板型の望遠鏡の角分解能劣化原因である2つの誤差を改善しつつ基板の強度を上げるために、十分な 精度と強度を持つ面に押し付ける方法が最善であると考えられる。位置決め誤差と鏡面形状誤差の うち、反射鏡の位置決め誤差を改善できれば結像性能は 80 秒角まで上げることが出来る (図 3.11 参 照)。ここで反射鏡の位置決め誤差といっても、大別して 2 種類の異なる要因の誤差に分類すること が出来る。一つはアライメントバーの位置決め誤差から来るもので、Primary と Secondary あわせて 独立した 4 本のバーを使って位置決めしているために生じる。仮に 4 本のアライメントバーのうち、 1 本だけ 100 [µm] 程度ずれていたとすると、望遠鏡の結像位置で 9 [mm] 程度異なる位置に像を結ぶ 事になる。そしてもう 1 つはアライメントバーのグループの誤差である。これはアライメントバーの グループは反射鏡を入れやすくするために 10-20 [µm] の遊びを持つように作られているために生じ る。アライメントバーの位置決めの場合と同様に反射鏡の 1 端がグループの中で 10 [µm] 程度ずれて いるとすると、角分解能は 1 分角程度まで低下してしまう事になり、表面形状誤差まで考慮すると望 遠鏡全体の角分解能は 1.6 分角まで低下してしまうことになる。さらに、鏡面の形状による誤差を補 正できれば、円錐近似による誤差の 19 秒角まで決像性能を向上させることが出来る (図 3.11 参照)。 このような 3 種類の誤差を補正する具体的な方法として、以下のような方法を考えた。

支持方式の検討 従来の ASTRO-E の XRT の反射鏡支持方式を図 4.1(a) に示す。アライメントバー の位置決め誤差は 4本の独立したバーによって構成されていることに起因している。これは、 図 4.1(b) のように 4本のアライメントバーを上下一体型にすることで改善されると考えられる。 次にグルーブ誤差であるが、反射鏡をグルーブに挿入するためにはグルーブのあそびをなくす ことはできない。しかし、図 4.1(c) のように反射鏡をグルーブに挿入した後で反射鏡の背面か らなにかしらの方法で反射鏡をおさえ込めば、このグルーブ内のあそびをなくすことはできる と考えられる。さらに、この押さえ込む場合に図 4.1(d) に示すようにグルーブを反射鏡全体が 通るように拡張しスリット状にして、反射鏡表面を精密に加工したスリット断面に押し付ける ことにより同時に反射鏡表面形状を補正することが可能となると考えられる。



(a)アライメントバー

(b)アライメントバーの誤差補正





(a) 溝形状の誤差補正



(d)鏡面形状誤差の補正

図 3.12: 支持方法の検討

第4章 反射鏡の表面形状の評価

節3.4では結像性能を向上させるための指針を示した。さらに、5章では反射鏡の製作について述べる が、これを望遠鏡に組み込む前にその形状を評価するシステムを構築しておく必要がある。そこで、 この第4章では反射鏡表面形状の評価法と測定システムをまとめる。

4.1 表面形状の評価

形状補正の効果を検討するためには、表面形状の評価方法について考えなければならない。もっと も直接的に表面形状を評価する方法は、平均値からの差分をとり表面形状の頻度分布を求め、平均二 乗根 (RMS:Root Mean Square)をとる方法である。RMSの定義を 4.1 式に示す。

$$RMS = \frac{1}{l} \sqrt{\int_0^l [f(x) - \bar{f}]^2 dx}$$
(4.1)

ただし、l は測定距離、f(x) は反射鏡の母線に沿って取った座標x での反射面の法線方向の位置、 \bar{f} は f(x) の平均値である。このように RMS を用いた形状評価では、表面の凹凸の大きさを定量的に 評価することができるが、望遠鏡の結像性能の評価に使われる角分解能に直結しない。そこで、法線 揺らぎを用いた評価方法を用いる。法線n は、

$$\boldsymbol{n} = \arctan(\frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}})$$
(4.2)

のように隣り合った 2 点を結ぶ直線に直交するベクトル (法線ベクトル) として求めることができ る。このとき基板の形状が理想的な直線だった場合の法線ベクトル n とのなす角を θ_n とし、 θ_n の頻 度分布を法線揺らぎと定義する。しかし実際には、測定対象物の面が荒れていたり、4.2 で述べるよ うに取得した測定値はステージの移動による振動やステージ揺らぎ (図 4.2 参照) のため、4.2 式では 正確な法線揺らぎを求めることができない。そのため、取得した測定値を一定間隔ごとに区切り、そ の区間の測定値を直線でフィットし得られた傾きから法線ベクトル N を求めた。

このようにして得られた法線揺らぎは、ダブルピークやそれ以上のピークを持ち、正規分布にはならなかったので、鏡面形状の評価は法線揺らぎの頻度分布における HPW(Half Power Width:全データの平均を中心として全数の 50%が入る幅)をとることで行なった。この法線揺らぎの HPW は、近似的にはガウス分布に従うとすると、3.1.1 で定義した望遠鏡の結像性能を表す指標である HPD との間には、

$$HPD \approx 2 \times \sqrt{2} \times HPW \tag{4.3}$$

の関係が成り立つ。ここで、係数 2 は入射 X 線と反射 X 線のなす角は、入射 X 線と反射面のなす 角の 2 倍になる効果を表し、 $\sqrt{2}$ は上下 2 段で 2 回反射する効果を表している。

反射鏡面には非常に様々な表面波長スケールの凹凸が存在している。法線揺らぎによる形状評価方 法を用いた場合、その値は表面の凹凸の大きさではなく、表面に存在する傾斜角によって決まる。そ のため、同程度の凹凸の Peak to Valley(PV 値)の大きさをもつ表面でも、母線方向に渡って何波長分 のうねりが存在しているかによって法線揺らぎの値は大きく異なる。仮に、反射鏡鏡面に母線方向の 長さと同程度の表面波長スケールのうねりが存在しているとすると、凹凸の PV 値の大きさは 3 [µm] 程度でも角分解能は 1 分角以下になる。しかし、反射鏡母線方向に 1 [mm] 程度の表面波長スケール のうねりが存在していると、表面形状の PV 値を 0.03 [µm] 以下にしなければ 1 分角以下の角分解能 を得ることはできない。このように RMS は表面の凹凸の PV 値の大きさを反映するのに対し、法線 揺らぎからもとめた HPW の値は、反射鏡の表面波長スケールによって大きく異なる。

本論文では、表面形状を RMS や HPW、HPD を必要に応じて使い分けて評価する。

4.2 レーザー光による形状測定システムの構築

前章でのべたような反射鏡表面や基盤、マンドレル、熱成形金型の形状を測定するために、レー ザー変位計を用いた形状測定システムを構築した。本研究の目的は鏡面形状の補正であるので、鏡面 形状の変化を起こす可能性のある接触式の形状測定器を用いることはできない。しかし、サブミクロ ン以下の精度で測定を行う必要があるため、非接触のレーザー変位計を採用した。本研究で使用して いるレーザー変位計は、鏡面のようななめらかな面の測定に適した正反射型と、切削面などの荒れた 面の測定に適した共焦点型がある。本章では、上記の2種類の変位計を用いた測定システムの性能と 特性について議論する。

4.2.1 測定システムの構成

今回用いた測定システムは図4.1 に示したように、レーザー変位計、X軸、Z軸並進ステージ、サン プル固定治具よりなりたっている。図4.1 に示したようにレーザー変位計を測定対象物を下から見上 げるかたちで取り付け、治具によって固定された測定対象物との距離をZ軸ステージで調節し、レー ザー変位計の許容範囲内に固定する。その後、X軸並進ステージによって測定対象物を図4.1 にある X軸方向に動かしつつ、同時にレーザー変位計の値を読みこみ形状測定をおこなっている。

並進ステージには、一般的にピッチングとヨーイングという鉛直方向の揺れと、水平方向の揺れが 存在する。サブミクロンの測定に於いては、これらの揺れを鏡面の形状と分離する必要がある。そ のため、面精度 $\lambda/20^1$ である石英でできたオプティカルフラットを測定し、ステージ揺らぎの成分を 分離した。実際には、オプティカルフラットを支える治具の傾斜が含まれるが、その傾斜は測定デー タを一次関数でフィットし差をとることで除き、ステージ揺らぎのみを取り出すことができる。オプ

¹面精度 $\lambda/20$ とは、最大形状誤差 (PV 値) が (検査) 波長の 1/20 ということ。干渉計で測定している場合、多くの場 合検査波長 λ は 0.633 [μ m] なので $\lambda/20$ は 0.032 [μ m] となる。





図 4.1: 測定システムの構成 -(上:実物、下:模式図)

ティカルフラットを用いて得られた測定範囲内のステージ揺らぎは図 4.2 の様になった。このような ステージのうねりは、以下で述べるよう非常に再現性が良く、そのため、鏡面の形状測定データから オプティカルフラットの形状測定データを差し引くことで、ステージ揺らぎを取り除くことが可能で ある。

4.2.2 正反射型レーザー変位計

原理

正反射型のレーザー変位計は、その基本原理に三角測量を用いており、発光素子と光位置検出素子 (PSD)の組み合わせによって構成されている(図4.3左))。発光素子には半導体レーザーを用いてお り、投光レンズを通して集光したレーザー光を測定対象物に投影し、その反射光を受光レンズを用い て PSD 上に結像させる。図4.3 左図のように測定対象物との距離が変化すると、PSD 上の像の重心 位置が変移するので、その変化量から三角測量によって測定対象物までの距離を割り出すことができ る。しかし、重心を用いているためゴーストや迷光によって、測定精度が低下してしまうため、対象



図 4.2: ステージの揺らぎ

物が鏡面やガラスなどの非常に表面精度のよいものでないと測定することができない。

正反射型のレーザー変位計は、PSD上の重心を求めるといる比較的簡易な方法を使って測定して いるため、50kHzという高速でサンプリングを行うことができる。そのため、本測定システムのよう に対象物を動かしつつ測定を行う場合でも精度良く測定することができる。また、測定対象物までの 距離を比較的長くすることができることも特徴の1つである。表 4.1 に正反射型レーザー変位計の仕 様をまとめる。



正反射型

共焦点型

図 4.3: レーザー変位計の測定原理

	LC-2430	LT-8010
測定範囲	$\pm 0.5 \; [\mathrm{mm}]$	$\pm 0.3 \; [\mathrm{mm}]$
作動距離	$30 \ [mm]$	$5 \; [mm]$
スポット径	$30{\times}20~[\mu m]$	$\sim 2 \ [\mu m]$
分解能	$0.02 \ [\mu m]$	$0.1 \; [\mu \mathrm{m}]$
サンプリング周波数	50kHz	1.4kHz
測定平均回数	1~131072 回 (18 段階切換)	2/16/128 回 (18 段階切換)

表 4.1: レーザー変位計の仕様

測定精度

4.1 でのべたように、同じ角分解能を得るために必要な表面の PV 値は表面波長スケールによって 大きく異なる。言い換えれば、どの程度の形状まで測定できるかによって補正効果を確認できる表面 波長スケールが決まってしまうので、より高い測定精度が必要となり測定精度や再現性は正しく見積 もっておく必要がある。

本測定システムは測定対象物を動かしながら測定しているため、レーザー変位計単体の測定精度だ けでは不十分であり、前章で述べたようなステージの揺らぎや、移動する際に振動を含めた測定シス テム全体としての精度を求めなければならない。そのため、以下に示すような方法で測定精度と再現 性を調べた。

- 測定精度 オプティカルフラットの測定を続けて数回行い、その平均値からの差分の頻度分布を調べることでシステム全体の精度を見積もる。
- 再現性 オプティカルフラットの測定を、一度セットアップを崩し日を新ためて測定することで再現 性を調べる。

このようにして測定した結果を、図 4.4-4.5 に示す。このように、測定精度は σ=0.09 [μm]、再現 性は σ=0.32 [μm] であることがわかった。このことから、正反射型のレーザー変位計を用いた測定 システムでは、10 [mm] 程度の表面波長スケールまで鏡面精度が1分角以下に達していると判断する ことができる。

4.2.3 共焦点型レーザー変位計

原理

共焦点型レーザー変位計とは、測定対象物の表面で反射したレーザー光の焦点を合わせることで対 象物までの距離を測定する方式を使っている。

共焦点型レーザー変位計は図 4.3 右図に示したような内部構造を持っており、光源から発射された レーザー光はハーフミラー、対物レンズを通り対象物表面で小さな像を結ぶ。レーザー光は、反射し



図 4.4: 測定精度

図 4.5: 再現性

て再びハーフミラーまで戻り、直角に反射されピンホールの位置で一点に集光されるため、ピンホー ルを通過し受光素子に到達する。対象物までの距離が変動すると、反射した光はピンホールの位置で 集光されず、ぼやけるため、ほとんどの光はピンホールを通過できず、受光素子にはわずかな光しか 到達できない。このような原理を用い、対物レンズを音叉をによって機械的に動かすことで、レンズ がどの位置にあるとき、光がピンホールを透過するかを検出することで測定対象物までの距離を測定 している。このように、測定対象物と焦点の合うレンズ位置を検出しているので、三角測量方式の変 位計では測定が難しかった表面の荒れや、色、傾きのある対象物でも高精度で測定することができる。

正反射型のレーザー変位計と異なり、共焦点型レーザー変位計は焦点を合わせるという複雑な過程 をふむため、サンプリング間隔を小さくすることができない。また、作動距離も 5 [mm] と非常に短 く、正反射型に比べて最小分解能も悪くなっている。共焦点型レーザー変位計の仕様を表 4.1 にまと める。

測定精度

正反射型のレーザー変位計と同様に、ステージも含めたシステム全体の測定精度と再現性を調べる。測定の結果、測定精度は σ=0.07 [µm]、再現性は σ=0.1 [µm] となり (図 4.6,4.7)、正反射型の レーザー変位計と比べると測定精度、再現性ともに若干良いことがわかった。これは、正反射型の レーザー変位計が測定原理に三角測量を用いているため、共焦点型の変位計に比べて測定対象物に傾 きがあると対象物までの距離を見誤りやすいことを示している。本測定では、治具自体の傾斜を補正 してしまっているためにこのような効果が現れてしまう。

本システムは測定対象物を移動させながら測定を行っているため、ステージの移動速度と測定平均 回数によって実効的なスポット径の大きさは、実際のスポット径の2 [µm] とは異なる。表 4.2 にス

第4章 反射鏡の表面形状の評価



図 4.6: 共焦点型レーザー変位計を用いた時の測 図 4.7: 共焦点型レーザー変位計を用いた時の再 定精度 現性

テージ速度を 1-5 と変えたときの移動速度と実効的なスポット径を示す。ただし、取得したデータは 128 回平均したものである。

速度	移動速度 ([mm]/s)	実効的なスポット $2\left(\left[\mu\mathrm{m} ight] ight)$
1	0.04	4
2	0.08	7
3	0.16	15
4	0.32	30
5	0.64	60

表 4.2: 並進ステージ移動速度と実効的なスポット径の関係

このように、速度を上げるほど実効的なスポット径の大きさは大きくなるので、表面形状をなまして 見ていることになり、実効スポット径よりも細かな形状は測定できない。実際に、アルミ基板の表面 をステージ速度 1-5 と変化させて測定した結果を図 4.8 に示す。

このように、速度を上げるほど表面の形状はなまされて測定されていることがわかる。この結果を より定量的な比較を行うために、速度 2-5 で測定した結果と、速度 1 で測定した結果を測定点数が同 程度になるように bin まとめしたもを比較した。図 4.9 に速度 1 で測定した結果を bin まとめしたも のと、速度 2-5 で測定したものそれぞれの平均値からの差分をとり RMS を求めた結果を示す。

その結果、実効スポット径が変わることによって測定される形状がなまされるだけでは説明できな いような実際よりも表面の凹凸をを小さく見積もっているという結果が得られた。図 4.9 で示したよ



図 4.8: 速度の違いによる表面形状の見え方 --上段が速度1で放電加工面を測定した場合にえられる形状、下の 段へ行くほど速度は 2,3,4,5 と早くなっており同じように放電加工面を測定した。



図 4.9: 速度の違いによる測定誤差 –白丸:速度 1 で測定した結果を各速度で測定点数が同じになるように bin まと めしたものから求めた RMS、黒四角:それぞれの速度で測定して得られた結果から求めた RMS

うな形状を小さく見誤る効果は、共焦点型のレーザー変位計が焦点を合わせることで測定対象物まで の距離を測定しているために、正反射型に比べて1点の測定にかかる時間が長いためにおこると考 えられる。本システムのように対象物を動かしつつ測定する方法では、焦点を完全に合わせきれてい ないために、速度をあげるほど対象物までの距離を小さく見誤っていることを示している。このよう に、細かな表面形状を測定するためには、ステージ速度はできるだけ遅い1で測定するか、1点1点 ステージを止めて測定する必要がある。しかし、当然ながらステージ速度を遅くするほど測定にかか る時間は長くなり、作業性が悪くなる。本測定で測定したい形状のうち大部分は切削面のような表面 の荒らさではなく、母線全体にわたるような大局的なので、局所的な形状を厳密に測定できなくても 大局的な形状を正しく測定できれば、ステージ速度を早くしても問題ない。そこで、ステージ速度を 5 に設定し表面の細かな形状に影響されないようにするために表面の滑らかな反射鏡面を測定し、同 じ位置を10 [mm] 毎にステージをとめて測定 (定点測定) することで大局的な測定精度を検討した (図 4.10)。



図 4.10: 定点測定 -実線は反射鏡鏡面を speed=5 で測定した結果。白丸は 10 [mm] 毎に定点観測により得られた結果。 どちらもステージの揺らぎは引いていない。

図 4.10 からもわかるように、ステージ速度 5 で測定した結果と定点観測した結果は非常に良く一 致している。この結果は、速度を早くすると焦点をあわせることができなくなるという上述の結果 と一致しており、鏡面のような滑らかな面は測定距離の変化が緩やかなため速度を上げても形状を正 確に測定できることを示している。しかし、共焦点型のレーザー変位計は、アルミ基板や放電加工面 の測定に用いることを目的としており、荒れた面に対しても早い速度で測定できることが望ましい。 そこで、図 4.8 の速度 5 で測定した値を 0.2 [mm] 毎に平均し、同じように 0.2 [mm] 毎に平均した速 度 1 の値との差をとり RMS を求めた。この値は速度 5 で測定した測定点を、0.2 [mm] 毎に平均し た値の信頼度を示しており、速度による違いがない理想的な場合には0になる。この値を求めると、 0.56 [μ m] となり速度5で測定し得られた値(0.2 [mm] 毎に平均した値)は、0.56 [μ m] 程度の誤差を 持つことになる。本測定では、1分角を切る角分解能を目指しており、典型的には表面形状を1 [μ m] 以下に補正することを目指している。0.56 [μ m] という値は必ずしも充分な値ではないが目標とする 測定を行うことはできる。

以上の結果をふまえ本論文では、局所的な表面形状を厳密に測定する場合はステージ速度1を、大 局的な形状を測定する場合はステージ速度5を使う。

4.3 X線による表面粗さの評価システム

製作した反射鏡の表面粗さを評価するため、宇宙科学研究所 5m ビームラインで X 線による測定を 行なった。ここでは、そのビームラインについてまとめる。

4.3.1 測定装置

宇宙科学研究所 5m ビームライン

ビームラインは最上流のX線発生装置、そこから延びるダクト、ダクトの下流側の先にあるサ ンプルチャンバーで構成されている。この章では5mビームラインの構成する装置と、具体的 な性能評価(X線反射率測定)の手法について述べる。図4.11、4.12は実際のビームラインの 全体と、検出器やステージが入っているチェンバーの写真である。図4.13は図4.11を真上から 見た摸式図である。

• X 線発生装置

X 線光源には水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス(RU-200)を使用している。 X 線発生の原理は次のようである(図4.14)。まず陽極のタングステンフィラメントに電流を流 し加熱して、熱電子を発生させる。そして陽極と陰極ターゲットとの間に高電圧をかけて、熱 電子をターゲットの方向に加速させる。そして、ターゲットに衝突した電子がターゲット原子 に束縛されている電子を電離した時は、空いた準位へ外殻の電子が遷移して、そのエネルギー 差に等しい特性 X 線を放出する。また、ターゲットへ向かう熱電子が原子核によるクーロン相 互作用による加速を受けた時に発生する制動放射の 連続 X 線を発生させることができる。ター ゲットには C(K_α = 0.282keV)、Al(K_α = 1.49keV)、Ti(K_α = 4.51keV)、Cu(K_α = 8.04keV)、 Pt(K_α = 9.44keV) が準備されている(図4.15)。ターゲット上での照射された熱電子のスポット サイズは 1.0mm × 10mm であるが、X 線の出射方向(X 軸)に対してターゲットの回転軸が約 6 度傾けてあるので、下流側から見たビームの実行的な焦点サイズは 1.0mm × 1.0mm(1.0mm × 10mm · sin 6 °)になる。X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を 調整することで制御している。

管電圧は 20~60 kV までかけることが可能で、この管電圧の範囲で 20~60 keV までの X 線を





図 4.12: チェンバー

図 4.11: 5m ビームラインを上流上方から下流を眺め たもの。手前から長く延びている管がダクトで、その 先の下流にチェンバーがある。手前にあるのはプレチェ ンバー。



図 4.13: 宇宙科学研究所 5m ビームライン 摸式図

発生させることができる。また、フィラメントに流す電流を変えることで、ターゲットに加速 衝突する電子の数を変化させ、X線の強度を調整することができる。その調整は電極間の電流 (管電流)を変えることで行なうことができ、その電流値の範囲は 10~200 mA である。最大 定格出力は 60kV200mA(12kW) である。



図 4.14: ターゲットの断面図と電子が衝突する様子



図 4.15: ターゲット写真(これは Al ターゲット。他のターゲットも同様の形状をしている)

ダクト・真空装置

X 線発生装置とサンプルチェンバーの間は平行度を上げるためにダクトで結び距離をとっている。大気中では X 線が吸収・散乱されてしまうため、ビームライン全体を真空に排気している。これらの真空度はピラニーゲージ ($7.6 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^{-3}$ [Torr])、イオンゲージ ($7.6 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ [Torr])でモニターしており、通常大気 $\sim 10^{-3}$ [Torr]まではピラニーゲージ、 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ [Torr]までをイオンゲージを使用している。

X線発生装置側、サンプルチェンバー側には各々ゲートバルブが設置され、個々に大気圧に戻 せる仕組みになっている。

• サンプルチェンバー



図 4.16: チャンバー内部写真、左から比例計数管、スリット、反射鏡、フィルター、ピンホール。右 側が上流で写真に対し左に向かって X 線は進む。

サンプルチェンバー内の写真を図 4.16 に示す。

サンプルチェンバーの入口には発生器側(以後、発生器側を上流と定義する)から来た X 線を コリメートするために直径約 100µm のピンポールを設置している。

X 線の分光

X 線発生装置からの X 線は、特性 X 線と連続 X 線からなる。特性 X 線に対する反射率を測定 する場合には、連続 X 線をできるだけ取り除く必要がある。本研究では透過型フィルターを用 いて単色化を行なっている。透過型フィルターは物質の吸収端における吸収計数の急激な変化 を利用した分光素子である。フィルターには特性 X 線の元素自身、あるいはそれより原子番号 が $1\sim2$ 番小さい物質がしばしば用いられる。このような物質は、 K_{α} 線より高エネルギー側の X 線に対して強い吸収を示すので、 K_{β} 線及び、高エネルギー側の連続 X 線を除去することが できる。実験では Ti – K_{α} に Ti フィルター ($50\mu m$ 厚)を使用した。

• $\theta - 2\theta$ **ステージ**、Y **ステージ**

測定チェンバーには、同軸の回転テーブルと回転アームからなる θ – 2θ ステージを設置してい る。この回転ステージの回転中心にビームが通るように前述したピンホールの位置が調節され ている。回転ステージの上には Y ステージを設置しており測定サンプルは専用のサンプルホル ダーに取付けこの上に置く(図 4.17)。Y 軸は X 線に垂直に動き、測定したいサンプルに X 線 を照射するために、Y 軸は横方向を調節するために用意している。

回転アーム(2 θ)の上にはスリット回転ステージ($slit-\theta$) X線検出器を設置している。スリットはサンプルの位置出しを正確に行なうために使用する。用途に合わせスリットの種類を変えるため、スリット回転ステージには50、150、450、800[μ m]のものが置かれており、スリット回転ステージを回すことでスリットの選択ができる。

名前	移動量	可動範囲
θ	1°/5000 pulse	-189~18
2θ	1 $^{\circ}/2500$ pulse	-
$slit - \theta$	1 $^{\circ}/250$ pulse	-
У	$1 \mathrm{mm}/500$ pulse	$\pm~28\mathrm{mm}$

サンプルチェンバー内ステージの仕様を表4.3に示す。

表 4.3: サンプルチェンバーステージ 各種パラメータ

● X 線検出器

本研究では X 線測定にガスフロー型比例計数管を使用している。

比例計数管(Proportional Counter:PC)は X 線検出器として最もよく用いられる検出器であ る。比例計数管は Al 製の金属管を使用しており窓の大きさは 5×20 mm で、窓にアルミナイズ ドマイラーを貼って管内を密封している。管の中心には $\phi 50 \mu$ m のタングステン芯線が張られて おり、X 線測定時には、管内に Ar90%、CH₄10% からなる P10 ガスを流し込み芯線に 2000V の高電圧を掛けて使用する。

PC に X 線光子が入射すると Ar 原子の内殻電子と光電効果を起こす。このとき光子のエネル ギーが内殻電子の束縛エネルギーより大きい場合、内殻電子は光子からエネルギーを受け取り 放出される。また放出された内殻電子の空席には外殻電子が遷移し、オージェ電子もしくは蛍 光 X 線を放出する。放出した内殻電子、オージェ電子は他の Ar 原子の外殻電子を電離させ、結 果として X 線エネルギーにほぼ比例した数の一次電子を創る。この一次電子は電場によって芯 線方向に加速され、芯線近傍で Ar 原子を次々と電離し電子雪崩とよばれる現象を起こすので、 電子の数は 10⁴ 倍程度に増幅される。この増幅された電子は芯線を通ってコンデンサーで電圧 値に変換され、さらにプリアンプを通して出力される。



図 4.17: 左奥が比例計数管その手前がスリット回転ステージとスリット、中央にサンプルとYステージ。

- 4.3.2 測定方法
- 反射鏡、X線ビームおよび検出器のアライメント
 - X 線検出器の位置合わせ
 X 線ビーム軸上の障害物を全て移動させた後、X 線ビームを横切るように 20 ステージで 検出器を移動させながら X 線強度を計測し、X 線強度が最大になる位置を探す。検出器の 中心に X 線ビームが来るようにセットし、検出器の原点とする。
 - 2. 検出器前スリットの位置合わせ

サンプル位置を詳細に決定する目的でサンプルアライメント中は検出器前にスリットを入れる。スリットは X 線強度を計測しながら X 線ビームを横切るように slit – θ ステージを回転させていくことでスキャンする。X 線のカウント数が最も大きくなる位置をスリットの原点とする。スリット幅は 0.1mm のものを使用している。

- 検出器 + スリット 位置合わせ
 検出器前スリットが検出器前にある状態で X 線ビームを 20 ステージの回転によりスキャンし X 線のカウント数が最も大きくなる位置を改めて検出器の原点とする。
- 4. サンプルと X 線の平行出し
 Y ステージを用いてサンプルを X 線のカウント数が半分程度になる位置に移動させた後、

第4章 反射鏡の表面形状の評価

この位置でサンプルを θ ステージで回転させると、サンプルと X 線が平行になったときに カウント数が最大になる。この方法によりサンプルが X 線に平行でかつ、サンプルが X 線ビームの半分を隠す位置を求める。

5. X線反射光による確認

サンプルを θ 、検出器を 2θ だけ回転させ、検出器のみをこの付近で移動させ反射強度を確認する。これには X 線ビームを隠しているものが目的のサンプルであることと 4 で求めたサンプル角度が正しいことを確認する目的がある。

6. サンプルの測定点の決定

サンプルをビームと垂直方向に移動させ、X 線を半分に切る位置を正確に求める、この位置を $Y=Y_0$ とする。その後、サンプルを適当な角度 θ_a だけ回転させた状態で再び垂直方向に移動させ、X 線が半分になる位置 Y_a を探す。これらの数値が求まると、X 線が、サンプルのビームライン下流側の端から $(Y_0-Y_a)/\sin\theta_a$ の位置に当たっていることが分かる。このようにして X 線の初期位置が決まる。

- アライメントの終了
 検出器前スリットを光軸上から外してサンプルアライメントは完了する。
- 反射率測定

反射率は基本的に反射光のスペクトルをダイレクトのスペクトルで割ることによって得ることができる。

- ダイレクトビーム強度の測定
 光軸上からサンプルを外し、X線のダイレクトビームの強度を計測する。
- 測定
 サンプルを光軸上に戻してから、サンプルを θ 回転させるごとに検出器を 2θ 回転させ、
 入射角 θ における X 線の反射強度を計測する。
- 3. ダイレクトビーム強度の測定 再び X 線のダイレクトビームの強度を測定し、測定前後でビームの強度に大きな変化がな いことを確認する。

表面粗さの評価

節 2.2.2 で導出した表面粗さに対する反射 X 線強度の式(2.35)の両辺を入射 X 線強度 I₀ で割って やると、



図 4.18: 反射率測定中の各ステージの位置

$$R = R_0 \exp\left(-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta_i}{\lambda}\right)^2\right) \tag{4.4}$$

となる。この式は、ある波長 λ の X 線が表面粗さ σ の反射面で反射された場合の反射率 R と粗さ が無い場合の反射面での理論的な反射率 R_0 との関係を示している。ここで、 R_0 は式(2.23)で表さ れる。そして反射率を θ の関数として測定した結果に、式 4.4 の表面粗さ σ のみをフリーパラメータ としたモデルをフィッティングすることにより、反射鏡の表面粗さを評価する。

第5章 レプリカ法による円錐形反射鏡製作システ ムの構築

5.1 レプリカ法

斜入射型 X 線望遠鏡に於いて軽量かつ高い開口効率を実現するためには、反射鏡の基板を薄くし 動径方向に多数枚積層しなければならない。しかし、薄い基板を用いた反射鏡は *Chandra* 衛星に採 用された厚いガラス基板を用いた反射鏡のように研磨等による直接的な表面加工が困難である。そこ で、このような薄い基板を用いた反射鏡の製作法として考え出されたのがレプリカ法である。レプリ カ法とは、表面形状の良いガラスの母型(ガラスマンドレル)に用途に合わせた反射膜を蒸着し、エ ポキシ樹脂等の接着剤を用いて薄い基板にその反射膜を写し取る方法である。以下に今回実際に行っ たレプリカ法の作業行程を示す。

- 1. 基板の製作
 - 基板の切り出し
 - バリ取り
 - ローラーによる粗成形
 - 熱成形
- 2. ガラスマンドレルに反射物質を成膜
- 3. 基板と反射膜の接着
 - エポキシの噴霧
 - 基板の圧着
 - エポキシ硬化
- 4. 基板の剥離

この様工程によって製作されるレプリカ反射鏡の表面形状は母型であるガラスマンドレルの表面形 状を反映するため、直接的に基板の表面加工を行わなくとも表面形状の良い反射鏡を製作することが できる。以下では反射鏡製作の各工程を詳しく述べるとともに、工程ごとのガラスマンドレル、アル ミ基板、レプリカ反射鏡の表面形状を基に製作工程やその精度を評価していく。

5.2 反射鏡基板の製作

今回製作した新型 X 線望遠鏡は Wolter I 型光学系を採用しており、アライメントプレート内の溝 は回転放物面と回転双曲面を円錐近似した形状となっている。そのため、本論文におけるプレート内 の溝に弾性体を用いて反射鏡を押し付け形状を補正するという新たな試みを行う際、反射鏡に最低限 の力を加えるだけで形状補正を実現させるためには押し付ける前から比較的プレート内の溝の形状に そった円錐形の反射鏡が必要となる。そこで、今回は基板の切り出しの工程から円錐形の反射鏡製作 を目指したものに製作システムを構築していった。

5.2.1 反射鏡基板の切り出し

基板の切り出しは反射鏡の外形形状を決めてしまうものであり、熱成形を行う際にも基板の外形状 が揃っていないと基板形状の劣化の大きな原因となるため精度良く切り出さなければならない。そ こで今回は、サブミクロンの精度で金属を加工することができる放電加工を用いて基板の切り出し を行った。基板を円錐形反射鏡用にするためには、切り出しの段階から基板の形状を円錐を展開した ものにしておく必要がある。切り出した基板の外形は扇型をしており、その上下の曲率のパラメータ はアライメントプレート内の溝形状によって決定される。例として下の表 5.1 に望遠鏡中心から半径 100 mm の所にある溝の設計パラメータを示す。

	Top-R	Bottom-R	Elevation [degree]
Primary	100.0595	100.0589	0.3022
Secondary	99.9418	98.3340	0.6044

表 5.1: アライメントプレート溝内の各パラメータ(R100)

5.2.2 バリ取り

放電加工で切り出した基板にも、刃物で切り出した基板ほど大きなものではないが、端面に多少の バリがでてしまう。基板の端面にバリがでていると、熱成型時に基板の外形が揃っていないのと同様 に基板形状を劣化させる原因となってしまう。そのため、この様なバリを取り除くため基板端面のバ リ取りを行う必要がある。バリ取りの作業はまず図 5.1 のようにルーターを使って荒らくバリを取り、 その後 2000 番の紙やすりを使いルーターにを使う事で新たに生じたバリを取り除き、きれいに仕上 げる。

5.2.3 ローラによる粗成型

切り出し、バリ取りを行ったアルミ基板を、図 5.2 のようにローラーを通して円錐形に粗成形する。 粗成形の目的は熱成形用金型への基板の配置を容易にするためのものである。基板の外形がそろって



図 5.1: バリ取り - 左図:模式図、右図:実際の作業の様子

いても、金型の上に精度よく配置することが出来なければ形状を劣化させてしまう。



図 5.2: 粗成形 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

5.2.4 熱成形

熱成形とは、ローラーにより粗成形されたアルミ基板を、目標としている反射鏡形状に精度良く加 工されたアルミ母型に押し付け加熱することにより、目標とする反射鏡形状に成形することである。 アルミ母型の表面形状はアライメントプレートの溝内と同様に円錐の一部となるように精度良く加工 されている。その表面形状の評価は次のセクションに示す。実際のアルミ母型は図 5.3 に示すように 真空排気用の穴が開けられており、そのまわりに基板より四方を 5 mm ほど大きく切ったシリコン シート(ガスケット)を貼り、ロールしたアルミ基板をガスケットと同じくらいの厚みとなるように 積層し、ガスケットの枠内に配置する。

その上からカプトンフィルムを貼り、密閉して真空排気を行うことにより基板はカプトンフィルム



図 5.3: 熱成形 -- 左図: 模式図、右図: 実際の作業の様子

の側から大気圧(単位面積当たり約 1kg/cm²)で円錐のアルミ母型に押し付けられる。この状態で 160 まで加熱し 10 時間加熱することで、基板は目的とする形状に成形される。熱成形の際には、基板 を重ねるため1枚1枚の基板の歪みや、基板の切断面に生じるバリ、基板の間へのほこりの混入が形 状劣化の原因となる。すでに述べたように基板は多数枚積層して熱成形するため、内側の基板にこの ような形状を劣化させる原因があると、その基板よりも外側に積層した基板はすべて形状を劣化させ てしまう。熱成形した基板の形状精度が、レプリカ反射鏡自体の形状に大きく作用するので、熱成形 における基板の選択、取扱には細心の注意を払わなければならない。

5.2.5 熱成形用アルミ母型と熱成形後のアルミ基板の表面形状

レプリカ法で製作する反射鏡がガラスマンドレルの表面形状を写し取るように、熱成形を行ったア ルミ基板は熱成形金型の形状を反映したものとなる。そのため、金型は精度よく加工されたた表面形 状の良いものでなければならない。そこで、今回熱成形にもちいる円錐形の金型の表面形状を共焦点 型のレーザー変位計(節 4.2.3)を用いて測定した。測定範囲は熱成形に使用できる穴から 200mm の 所までで、真空引き用の穴を中心に左右へ 25 度間隔で測定した。図 5.4 に測定した R100 熱成形金型 の表面形状の結果を方位角方向に展開し 3 次元的に表した。望遠鏡の primary と secondary に用い られる反射鏡はそれぞれ円錐形状が異なるため、同様の径の金型は 2 種類必要となる。今回はそれぞ れに ID として R71-P、R71-S¹を与えて区別した。図からみてとれるように真空引きの穴の周辺は多 少歪んでいるが、実際に熱成形に使用する部分は 1[µm] 程度の凹凸しか存在しない。これは、理論上 この金型と同程度の表面形状をもつ基板を熱成形によって成形出来ることを示している。

4.1 章で述べた反射鏡の形状評価に用いる法線揺らぎを使い、熱成形金型の形状評価を行う。図 5.4 で示した母線方向の形状から、法線揺らぎを求めると金型表面の平均的な法線揺らぎは表 5.2 のよう になった。この法線揺らぎから望遠鏡の角分解能を算出すると、Primary と Secondary の 2 回反射 で 36 秒角となる (式 3.11)。よって、理想的にこの金型で熱成形を行えたアルミ基板を反射鏡製作に

¹R71とは金型の半径ではなく、ASTRO-EにおけるR100のフォイル番号を参照した

用い、全ての過程で形状を損なわなければこの結果と同程度の高い角分解能をもつ反射鏡を製作する ことが可能である。



図 5.4: 熱成形金型表面形状 - 熱成形金型の母線方向の形状を真空引き用の穴を中心に 25 度ごとに測定し、方位角 方向に展開し 3 次元 + 2 次元的に表した。右図:R71-P, 左図:R71-S

ID	平均法線揺らぎ(秒角)	
R71-P	7.8	
R71-S	16.3	

表 5.2: 熱成形金型表面形状の平均法線揺らぎ

次にアルミ基板が熱成形の前後でどのように変化したかを知るために、基板の同じ位置の母線形状 を測定した。図 5.5 に測定結果を示す。図 5.5 に示した熱成形後の形状は、熱成形時に積層した金型 に接している1番内側の基板である。

熱成形金型と同様に、母線方向の形状からそれぞれの法線揺らぎを求めると表 5.4 に示す結果で あった。熱成形後の基板は金型の表面形状よりも悪く法線揺らぎが 30 秒角程度となるが、熱成形前 の基板と比べれば格段に形状が良くなっていることがわかる。前述したように、熱成形金型通りに熱 成形されていれば法線揺らぎは 10 秒角前後になるはずであるが、そのような結果とはなってはいな い。このような形状の劣化は熱成形の工程、又はそれ以前の工程に改善の余地があることを示してい る。しかし、この数 µm 程度の形状の劣化であればアルミ基板に金の反射膜を接着する工程で使用す る接着剤により吸収することが出来ると考えており、問題となるような形状劣化ではないと言える。

ID	熱成形前の法線揺らぎ(秒角)	熱成形後の法線揺らぎ(秒角)
$120\mu mR100-S$	112	34
$150\mu mR100-P$	64	32



表 5.3: 熱成形前後のアルミ基板母線方向の法線揺らぎ

次に金型に積層した基板²が外側にいくにつれてどのように形状が変化しているかを調べるため、 内側から1枚目、5枚目、10枚目、15枚目のアルミ基板の母線方向の表面形状を測定し、その結果を 図 5.6、5.7に示す。測定の結果、図に示すようにアルミ基板の母線形状は大部分は内側と外側でほぼ 同じ形状をしている。このことから基板の厚さは1~2[µm]の精度で均一なものであることがわかっ た。もしも基板に厚さむらが存在すれば、熱成形の性質上それは外側の基板へと伝搬し外側の基板を 大きく変形させてしまうからである。しかし、基板の両端1[mm]程度の範囲では外側にいくほど基 板の母線形状が徐々に悪くなっていることがどの結果からも見て取れる。この部分は、熱成形の前段 階であるバリ取りの工程で加工した部分である。そのため原因として最も考えやすいのは、バリとり の際に両端の基板の厚みにむらがでてしまうのではないかということであるがはっきりとした原因は 未だわかっていない。この形状劣化はひどいときには10µm 以上のスケールで起ってしまう。このス ケールになると上記したような接着剤による吸収が効かなくなる可能性がでてくるため、これより先 の工程で使用するアルミ基板は出来るだけ内側に積層したものを使う方が良いと考えられる。

図 5.5: 熱成形前後のアルミ基板表面形状-熱成形前後のアルミ基板の母線方向の形状を測定し、比較した。左図:120µmR100-S,右図:150µmR100-P

²120µm 厚の基板は 23 枚、150µm 厚の基板は 19 枚積層している



図 5.6: 熱成形後のアルミ基板表面形状-熱成形後のアルミ基板の母線方向の形状を熱成金型表面から 5 枚ごとに 測定し,形状を比較した。上図:120µmR100-P,下図:120µmR100-S



図 5.7: 熱成形後のアルミ基板表面形状-熱成形後のアルミ基板の母線方向の形状を熱成金型表面から5枚ごとに 測定し,形状を比較した。上図:150µmR100-P,下図:150µmR100-S

5.3 ガラスマンドレルへの反射膜(金)の蒸着

反射物質の成膜は、スパッタリング現象を利用したスパッタリング法を用いてガラスマンドレルの 表面に金を成膜する。スパッタリング現象は1842年にGroveによって発見された現象で、固体ター ゲットの表面に高エネルギーの粒子を入射させると、この粒子の運動エネルギーを得て表面付近の原 子・分子間で衝突が生じ、そのエネルギーが原子・分子の結合エネルギーよりも大きい場合に表面か らターゲット物質が飛び出す現象である。スパッタリング法の詳細については、5.3.2章で述べる。

5.3.1 マンドレルの洗浄

本章の導入部でも述べたようにレプリカ法の最大の利点は、薄いアルミ基板に母型となるガラスマ ンドレルの滑らかな表面形状を写し取ることができることである。しかし、マンドレルの表面に汚れ や水跡、傷などがあると、マンドレルの表面形状とともにレプリカ法を用いることによってあわせて 写し取ってしまい、結像性能や反射率を低下させる原因となる。そのため反射膜の成膜前に行うガラ スマンドレルの洗浄は、反射鏡の性能を決める重要な工程といえる。そこで、本章ではマンドレルの 洗浄方法について議論する。

マンドレルの洗浄においてもっとも注意深く取り除かなければならないものは、前回のレプリカ反 射膜成膜時に付着した蒸着物質の残りである。ちりや埃に比べて表面に残った蒸着物質は取れにく く、特にマンドレル表面に傷があるとその部分に金が残り非常に剥がれにくくなる。マンドレル表面 に金が残っているとその部分は、基板を剥離する際にも剥がれずに残っている可能性が高い。また、 蒸着物質やごみ以外にも洗浄に使うエタノールやイオン交換水の中に含まれている不純物にも注意し なければならない。マンドレル表面に水滴が残っていると、乾燥した後もその部分には水跡が残る。

本論文では以下のような工程をとることにより、ガラスマンドレルの洗浄を行った。

- 1. マンドレルに残った蒸着膜をテープで剥離
- 2. テープで取れなかった蒸着物質をかみそりなどの硬いものを押し当ててとる
- 3. エタノールで洗浄
- 4. イオン交換水で洗浄
- 5. 表面の水滴をエアーで吹き飛ばす

6. 恒温槽で乾燥

2.の工程では、ガラスマンドレルを傷つけないように注意しなければならない。かみそりは、反射 物質を削ぐのではなく、あくまで押し当てて取るために用いる。3.の工程では、マンドレル表面に付 着している埃やごみ、剥がれた反射物質を洗い流す。それとともにガラス表面に付着した油やテープ の粘着物質を取り除く。4.の工程では3.で使用したエタノールの内部に含まれている混入物を洗い 流す。5.そして、イオン交換水のなかに含まれている混合物を表面の水滴として残さないためにエ アーを使って吹き飛ばす。(6.) 最後に 50 度のオープンで乾燥させる。
5.3.2 金の成膜

洗浄し終わったガラス母型に反射鏡面となる金を成膜する。金の成膜には、スパッタリング現象を 利用した大阪真空社製の DC マグネトロンスパッタ装置を使用している (図 5.8)。膜の厚さはターゲッ トとマンドレルの間にコリメータを置きマンドレルを自転させて制御している。



図 5.8: 金の成膜 – 左図:模式図–ターゲット近傍には永久磁石によりアルゴンのプラズマが閉じ込められ、電場によ リアルゴンイオンがターゲットに打ち込まれる、右図:実際の作業の様子

スパッタリング法の原理

高真空 (1mTorr) の電極間にスパッタガスと呼ばれるガスを流し込むと、高エネルギーの宇宙線な どにより電離されて一次電子が創られる。ここにターゲットを陰極として数 100~1000 V 程度の高電 圧を印加すると、電子は電場と逆方向に加速され、エネルギーを増しながら次々にガスを電離する。 このようにして、電極間にグロー放電によるプラズマが形成される。スパッタリング装置では、この プラズマ中の陽イオンを陰極付近の陰極電位高下で加速させ、ターゲットに衝突させることによりス パッタリング現象を得ている。この現象で発生した粒子をスパッタ粒子といい、陽イオンー個あたり に発生するスパッタ粒子の平均個数をスパッタ率という。スパッタガスには、化学的に安定で他のガ スよりも大きなスパッタ率が得られる Ar ガスを使用している。

スパッタリング法の最大の利点は生成した成膜物質の粒子が、keV 程度の陽イオンと運動量を交換 して生じるため、10 eV オーダーの高いエネルギーを持つことである。このような高エネルギーの粒 子によって形成された薄膜は、表面での原子の移動が起こり易いのでより緻密な膜になる。また、ス パッタ法は成膜速度が一定で膜厚の制御性に優れていることも利点の1つである。

スパッタリング法の欠点としては、スパッタガスを導入するので成膜中の真空度を高くすることが できないことである。このスパッタガスが成膜中に混入するため、純粋な薄膜を得ることが困難であ るといわれている。

スパッタリング法にはいくつかの種類があるが、本論文では大阪真空社製のスパッタ装置を使用している(図 5.8)。本測定で使用している大阪真空社製のDCマグネトロンスパッタ装置は、放電空間に磁場を掛けることにより成膜速度を大きくしたものである。電子は磁場によるローレンツ力を受けてサイクロトロン運動をするようになり、電子をターゲット近傍に閉じ込めることができるため、陽イオンの生成率を上げ、成膜速度を大きくすることができる。また、より低いガス圧で安定したプラズマを作り出すことが可能である。

5.3.3 ガラスマンドレルの形状測定

金を蒸着するガラスマンドレルは、溶かしたガラスを円柱状に引き延ばし表面を溶けた状態の液面 の滑らかさに保ったまま固める、引き抜き法という手法で製作されている。この手法で製作されたマ ンドレルは非常に滑らかな表面を形成することが出来るが、マンドレルの母線方向に 10µm ほどのス ケールのうねりを生じてしまう。すでに述べたようにレプリカ法は、マンドレルの表面形状を写し取 るので、マンドレル表面の形状よりも平坦な反射鏡を製作することはできない。つまり、使用したマ ンドレルの表面形状から求められる結像性能が、反射鏡の結像性能の上限値となるので、ガラスマン ドレルの表面形状を十分理解しておく必要がある。また、反射膜の転写が成功したかどうかを知るた めには、マンドレル表面に様々なうねりが存在しているので反射鏡面の形状を測定するだけでは不十 分である。レプリカ法において転写の良し悪しを調べるためには、対応するマンドレルの位置を測定 し正しく形状を写し取れているかを調べなければならず、そのためにもマンドレル形状を測定してお

³実際には10個用意されていたが測定の結果、レプリカするマンドレルとして適さないものが2個排除された。

いており、そのそれぞれに ID として R100-01~R100-09、R80-01~R80-04 と通し番号をつけて管理 している。今回は、反射鏡製作に主に使われた R100 のガラスマンドレル母線形状を共焦点型のレー ザー変位計(節4.2.3)を用いて 20 度ごとに測定した結果を図 5.9、5.10 に示す。それぞれの形状は熱 成形金型と違い、マンドレル毎に個性があり、2~5 [µm] のうねりをもつことがわかる。また、その 形状測定の結果からそれぞれのマンドレルの平均的な法線揺らぎを求めると表 5.4 のようになった。 この形状測定の結果から、反射鏡単体で HPD に換算して 1 分角を切るようなものを製作するために はマンドレル R100-01、04、05、09(望遠鏡の角分解能換算でそれぞれ 1.02 分角、0.98 分角、0.68 分角、0.85 分角)を用いなければならないことがわかる。しかし、レプリカ法の習熟のため反射鏡を 多数枚製作する必要があるので、今回は 8 個のマンドレル全てを用いておよそ 100 枚程度の反射鏡を 製作した。作成した反射鏡の表面形状評価は節 5.6 で述べる。

ID	平均法線揺らぎ(秒角)	ID	平均法線揺らぎ(秒角)
R100-01	21.7	R100-06	25.2
R100-03	34.8	R100-07	38.5
R100-04	20.7	R100-08	43.3
R100-05	14.4	R100-09	18.1

表 5.4: ガラスマンドレル表面形状の平均法線揺らぎ

5.4 アルミ基板と反射膜の接着

5.4.1 エポキシ樹脂の噴霧

成膜されたマンドレルと反射鏡基板を接着するために、基板に接着剤となるエポキシを噴霧する。 本測定で用いたエポキシ樹脂は Epoxy Technology Inc 製の EPO-TEK 301-2を用いた。EPO-TEK 301-2は、アウトガスの非常に少ないエポキシで A 剤と B 剤の 2 液からなり 100:35 で混合し、粘性 を下げるためにトルエンで 80%希釈し用いる。また、エポキシ樹脂は水分が混入すると硬化時間を遅 らせたりまったく硬化しなくなるといったような硬化阻害を起こすので、エポキシ混合時は十分注意 を払わなければならない。

エポキシの噴霧は、基板の曲率を持った広い面にエポキシの厚みを均一に、しかもエポキシの厚み をミクロン単位で制御する必要がる。そのため、図 5.11 のようなスプレーシステムを構築した。こ のシステムは、上下に動く Z ステージに固定されたスプレーノズルと、アルミ基板をのせる回転ス テージからなる。各ステージの動作は、連動させてプログラムで制御することができる。今回のレプ リカ鏡製作では回転ステージが 10 度動くごとに Z ステージが上下に 1 往復するように設定した。回 転ステージの往復回数、ステージの移動速度を変えることにより、基板にスプレーされるエポキシ量 を調節することができる。



図 5.9: マンドレル表面形状 –ガラスマンドレルの母線方向の形状を20度ごとに測定し、方位角方向に展開し3次 元+2次元的に表した。右上図:R100-01, 左上図:R100-03, 右下図:R100-04, 左下図:R100-05



図 5.10: マンドレル表面形状 –ガラスマンドレルの母線方向の形状を20度ごとに測定し、方位角方向に展開し3 次元+2次元的に表した。右上図:R100-06, 左上図:R100-07, 右下図:R100-08, 左下図:R100-09

スプレーノズルはスプレーイング・システム・ジャパン社製のエアーアトマイジングノズルを用いた。図 5.11 のようにスプレーノズルの上部から空気を入れると、差圧により下部に取り付けられた エポキシを吸い上げる。吸い上げられたエポキシは空気と混合させることで、最小径 7 [µm] の微粒 子を生成することがでる。また、スプレーパターンは円形のラウンドパターンを採用した。



図 5.11: エポキシの噴霧 - 左図:模式図、右図:実際の作業の様子

5.4.2 圧着

スプレーした基板と金を成膜した母型を接着し、エポキシを硬化させる。アルミ基板とマンドレルの接着は、間に空気の混入を避けるために真空層の中で行なう必要がある。また、エポキシには空気と希釈剤として用いたトルエンが入っており、これらを脱泡し飛ばさなければならない。そこで、図5.12の様な圧着システムを構築した。



図 5.12: 圧着 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

図のように真空層の内部に Z ステージがあり、エポキシの脱泡後大気中に戻すことなく圧着することが出来る。チャンバー内部の気圧が 1 Torr に達するとエポキシの脱泡はほぼ完了するので、ゆっく

第5章 レプリカ法による円錐形反射鏡製作システムの構築

りと Z ステージを降下させ母型と基板を圧着する。圧着後、チャンバーをリークし Z ステージをゆっ くりと上昇させてから母型と圧着した基板を取り出す。取り出した母型と基板は、50 度のオーブン にいれ加熱硬化する。今回使用した EPO-TEK 301-2 は、室温 (23 度) で 48 時間、80 度で 1.5 時間で 硬化する。しかし、硬化温度を上げすぎると、エポキシとアルミ基板の熱膨張率の違いにより、剥離 時に鏡面にダメージが現れる。このような反射鏡面へのダメージを避けるため、50 度で 10 時間加熱 後オーブンから取り出し、その後剥離した。

5.5 基板の剥離(反射鏡の完成)

5.5.1 剥離

エポキシが完全に硬化したらマンドレルから基板を剥離する。エポキシは水が混入すると、硬化が 遅れたり全く固まらなくなることがあるので、剥離前には必ず硬化具合を確認する必要がある。現行 の剥離法としては、反射鏡とガラスマンドレルの間にレンズクリーナーを滑り込ませ形状を歪めない ようにゆるやかに剥離する手法を採用している。



図 5.13: 基板の剥離 - 左図: 模式図、 右図: 実際の作業の様子

5.6 反射鏡表面の評価

5.6.1 レーザー光による反射鏡の表面形状

正反射型のレーザー変位計を用いて節 4.2 で述べた形状測定システムにより、剥離後の反射鏡の形 状測定を行う。前にも述べたように、レプリカ法によって製作された反射鏡の鏡面は平滑なガラス母 型の表面形状を写し取ることで薄いアルミ基板に滑らかな反射面を形成している。製作された反射鏡 の性能を評価するもっともよい方法は、反射鏡鏡面とレプリカに使用したマンドレルの対応する位置 を測定し、マンドレル形状を正確に写し取れているかを調べれば良い。図 5.14 に本論文で構築した 反射鏡製作システムを用いて製作した反射鏡の鏡面形状とマンドレルの対応する位置、それぞれの法 線揺らぎの相関関係を示す。本論文を書くにあたり 100 枚以上のレプリカ反射鏡を製作し、レプリカ 法の習熟につとめた結果、法線揺らぎが 20 秒角以下(HPD に換算すると1分角以下)の反射鏡を製 作することも可能となった。つまり現状の我々のシステムで Astro-E2 用に製作されている反射鏡と 同程度の性能を達成することができた。



図 5.14: 反射鏡とガラスマンドレル法線揺らぎ相関図 -黒丸-厚さ 150[µm] のアルミ基板を用いた反射鏡の法 線揺らぎ、星-厚さ 120[µm] のアルミ基板を用いた反射鏡の法線揺らぎ

5.6.2 X線による反射鏡の表面粗さ

この節では節 2.2 で論じた表面粗さに対する X 線の反射率の理論をもとに、実際に作成した反射鏡 表面の粗さについて定量的に評価していく。

X 線測定

実際の反射鏡の反射率の測定には節 4.3 で紹介した宇宙科学研究所の 5m ビームラインを用いて、 単色化された Ti の K_{α} (波長 λ =0.275[nm]) に対して節 4.3.2 で述べた角度スキャン測定を行っている。

この測定結果に式 4.4 の表面粗さ σ のみをフリーパラメータとしたモデルをフィッティングすることにより、反射鏡の表面粗さを求めた。また同様の測定が行われた ASTRO-E2 のサンプル反射鏡の表面粗さも求め, 結果を表 5.5 と図 5.15 に示す。

この結果から今回製作した反射鏡は、Astro-E2に搭載される反射鏡に比べ表面粗さが同等かそれ 以上のものが出来ているといえる。よって2章で述べたようにこの反射鏡は表面粗さから言えば、す でに衛星搭載に十分な性能を持っているということになる。またこの表面粗さの評価は同時にスパッ

ID	反射鏡表面粗さ (Å)
Foile P71-23	5.0 ± 0.06
Astro-E2 Test QT foil P102	6.3 ± 0.06

表 5.5: 今回作成した反射鏡と Astro-E2 のサンプル反射鏡の表面粗さ



図 5.15: 反射鏡の表面粗さ - 黒点が測定されたある角度における反射率、実線が理論反射率を表す。左図:Foil R71-23、 右図:Astro-E2 Test QT foil P102

タ装置の性能とガラスマンドレルの評価をも含んでおり、その評価も実用的に問題のない性能が示されたと言えるだろう。

第6章 120µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡の光学 測定

6.1 120µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡

6.1.1 X線望遠鏡ハウジングの試作

ここで、本論文の研究のために試作した望遠鏡ハウジングについてまとめる。設計略図を図 6.1 に 示す(詳しくは 2003 年早川修論を参照)。

- 1. 1/4 円周分(1Quadrant)のみを試作(材質アルミ)
- 2. アライメントプレートは計7枚を試作(材質ステンレス)し、セクターは上側から見て時計回 りにセクター1、2、、、6とIDをつける。
- 3. 反射鏡として以前製作した円柱形反射鏡と第5章で製作した円錐形反射鏡の2種類を用意、ア ルミ基板はどちらも1050-H18材の純アルミを使用

また、実際の写真を図 6.2 に示す。



図 6.1: 120µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡 Quadrant の設計略図

6.1.2 測定目的

第3章で述べたように今回のX線望遠鏡の設計の指針は、現行のアライメントバー(図3.12(a)参照)による支持方式の問題点を改良していくことである。その改良点としては、反射鏡の位置決め誤

差と反射鏡の鏡面形状誤差を同時に補正することを目指したアライメントプレート(図3.12(d)参照) の導入と弾性体による支持がその最たるものである。今回は試作としてアライメントプレートのス リット数を Primary と Secondary に各5本として、反射鏡を5枚積層できるようなプレートを用意 した。スリットの望遠鏡中心を中心とした半径は内側から R90mm、R95mm、R100mm、R105mm、 R110mm である。しかし、今回は製作できる反射鏡の半径が1種類(R100)しかないことから、5組 のスリットのうち4組のスリットには径の合ってない反射鏡を入れることとする。そして、それぞれ のスリットに入れる反射鏡に対して、径の小さい内側から Foil 1、Foil 2、Foil 3、Foil 4、Foil 5 と ID をつける。プレートを望遠鏡ハウジングに組込み、シリコンゴムフィラーで反射鏡を背面からス リット内の基準面に押しつけて上記の2つの誤差を補正することを試みる(図6.2)。その補正効果の 評価をするために、宇宙科学研究所の光学装置を用いて測定を行った。





図 6.2: アライメントプレートとゴムフィラーを用いた新望遠鏡--- 左図: 実際の写真、右図: ゴムフィラーを 用いた支持方式の略図

6.2 結像性能の定義と評価方法

XRTの結像性能の評価に用いたのは以下の3つの物理量である。

- 1. Point Spread Function (PSF)
- 2. Encircled Energy Function (EEF)
- 3. Half Power Diameter (HPD)

PSF は平行光が XRT に入射した場合の焦点面上の輝度分布であり、XRT の角分解能の評価に必要である。 また PSF は本来は空間的に 2 次元の関数 $PSF(\theta, \phi)$ (座標系は図 6.3 で定義する) である

が、本研究ではこれを焦点面での結像位置を原点とした平面極座標の動径rの関数として表した。これを単位面積あたりの光量をPSF(r)と定義する。

EEFは、焦点面上において中心から動径 r の半径の中に入ってくる光量を、全光量を1として規格化した値である。

また、PSFとEEFは

$$\operatorname{EEF}\left(r\,;\theta,\psi\right) = \int_{0}^{r} 2\pi r' dr' \operatorname{PSF}\left(r'\,;\theta,\psi\right) \tag{6.1}$$

のように互いに微分と積分の関係にある。さらに XRT ごと、またエネルギーごとの結像性能を比較 するため、今後は特に断らない限り、EEF と PSF は、

EEF
$$(r = 8'.8) = \int_0^{8'.8} 2\pi r' dr' \text{PSF}(r') = 1$$
 (6.2)

となるように規格化することにする。r=8'.8 は CCD の視野によっている。

HPD は全光量の 50%を含む円の直径で、EEF の縦軸が 0.5(50%) である半径の 2 倍の値である。



図 6.3: X 線の入射角 (Incident Angle : θ) と方位角 (Azimuthal Angle : ϕ) の定義—(ϕ は図中のように Quadrant の境界線から 45 °の位置をゼロ点とする。)

6.3 可視光測定

6.3.1 可視光による X 線望遠鏡性能評価

試作された望遠鏡は、X 線測定を行う前にそのおおまかな性能を平行光源を用いた可視光測定シス テムで測定する。しかし、可視光による測定は、1枚1枚の反射鏡の間が5mmと狭いことによる回 折限界や CCD 視野の小ささにより絶対的な望遠鏡の性能を評価することは不可能である。しかし、 真空引きなどいろいろと測定までに準備のかかる X 線測定の前に大まかな性能を把握し、それに備 えることは非常に重要なことである。

焦点距離

まず、組みあがった新望遠鏡が設計値通りの焦点距離となっているかを測定していく。今回の望遠 鏡のように上下2段型の望遠鏡では焦点距離は、Primary と Secondary の反射鏡の角度によってのみ 決まるので、今回のアライメントプレートのプレード角度が設計値通りに加工されていれば、反射鏡 をゴムフィラーで押しつけた場合の焦点距離は 4750mm となっているはずである。焦点距離の測定 は、まず望遠鏡と検出器の距離を様々に変えて、図 6.6 のような像を CCD で撮像する。その結像中心 から上下の 表面輝度が等しくとなるところを望遠鏡の焦点であると考えて行う。これは、Quadrant と検出器の距離が変わることにより、図 6.4 のように変化するからである。結像中心としては 表面輝 度 が最大となる点(Peak)と各セクターからの像が交わっている点(Cross Point)の2つを採用す る。その測定結果はゴムフィラーによる支持を行なった場合と行わなかった場合で図 6.5 のようにな り、それぞれの焦点距離は表 6.1 のようになった。支持した場合は焦点距離 4733~4751 mm とおよ そ設計値通りになっている。支持していない場合に焦点距離が多少伸びているのは、プレードの望遠 鏡中心からの半径と反射鏡の曲率がわずかに違っているため反射鏡がプレード内で遊んでしまってい ることが原因だと考えられる。この遊びを無くすことが、ゴムフィラーによる背面からの支持に期 待した位置決め誤差の改善点であり、その点ではこの支持方式は有効なものと言えるだろう。

支持の有無	Peak による焦点距離 [mm]	Cross Point による焦点距離 [mm]
支持した場合	4733	4751
支持しない場合	4757	4767

表 6.1: 可視光測定による焦点距離

結像性能

次に望遠鏡から検出器までの距離を 4750 mm に固定して、その焦点面での集光像を撮像して支持 の有無それぞれの場合の EEF と HPD を比較し評価する。また、以前までの反射鏡製作システムでは 今回作成した円錐形の反射鏡を製作することができず、試作として円柱形の反射鏡を作成していた。



図 6.4: 焦点距離 と集光像の変化



図 6.5: 可視光による焦点距離測定結果 – 左図:ゴムフィラーによる支持を行った場合の望遠鏡焦点距離測定結果、 右図:ゴムフィラーによる支持を行わなかった場合

今回は円錐形反射鏡にしたことによる望遠鏡性能変化の比較として、円柱形反射鏡を用いた X 線望 遠鏡の測定も行ってあるのでそちらも同様に比較するが、こちらは焦点距離が 4816 mm という測定 結果となっているのでその位置での集光像である。各場合の集光像は図 6.6 のようになっており、そ の EEF の比較も同時に示してある。また、各場合の HPD は表 6.2 のような結果となった。HPD の 値は CCD 視野がせまいことと回折による効果で正確な値とは言えないが、反射鏡を円柱形から円錐 形へと変更したこととこの支持方式を採用したことは結像性能の改善に繋がっているようだ。

表 6.2: 可視光測定による HPD 測定結果

	HPD [arcmin]
支持した場合	1.3
支持しない場合	1.9
円柱形反射鏡を支持した場合	1.8

6.4 X線測定

6.4.1 X線測定システム

試作された望遠鏡の性能評価は、宇宙科学研究所に設置されている 30m ビームラインを利用して 行なわれた。この節では、ビームラインにおける測定システムおよび検出器について説明する。

宇宙科学研究所 30m ビームラインの概要

宇宙研標準 X 線光源室における平行 X 線光源装置を図 6.7 に示す。以下に各装置に関する説明を 行なう。

X 線発生装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータ フレックス (RU-200)である。X 線発生の原理は次のようになっている (図 6.8)。まず陽極であるフィ ラメントを加熱することによって熱電子を発生させる。この熱電子は、回転する陰極ターゲットとの 間にかけられた管電圧によって加速され、ターゲットに衝突する。この時制動放射のメカニズムによっ て電子の受けた加速度と垂直方向に電磁波が発生する。管電圧は [kV] のオーダーなので、発生する 電磁波は X 線領域が主となる。一方でターゲットに蒸着された金属の内殻電子を弾き飛ばしもするの で、外殻電子のエネルギー準位との差にしたがった特性 X 線も発生する。宇宙研標準 X 線光源室での 測定に用いるターゲット物質としては、C-K α (0.282[keV])、Al-K α (1.49[keV])、Ti-K α (4.51[keV])、 Cu-K α (8.04[keV])、Pt-L(9.44[keV]) の 5 種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポッ



図 6.6: X 線望遠鏡の焦点画像--左上図:背面からゴムフィラーによる支持を行った場合の焦点面での像、右上図:ゴムフィラーによる支持を行わなかった場合の焦点面での像、左下図:円柱形反射鏡を用いてゴムフィラーによる支持を行った場合の焦点面での像、右下図:EEFの比較

トサイズは 10mm×1.0mm であるが、X 線の出射方向 (X 軸) に対してターゲットの回転軸は 6 °傾け て取り付けられているために、下流側から見込むビームの実効焦点サイズは 1.0mm×1.0mm になる。 また X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を調整することで制御して いる。X 線発生装置の仕様を表 6.3 に示す。

四極スリット

X線望遠鏡の特性測定においてはできるだけ高い平行度のX線を当てる必要がある。そのために、 X線発生装置から30mの長い距離をとり、四極スリットでビームを細く絞って使うことで、15秒角 (2mスリット使用時)という高い平行度を実現している。スリットの中心位置、Y及びZ方向の間隔 は、ワークステーションから直接制御可能で、それぞれを独立に動かすことができる。



図 6.7: 宇宙研標準 X 線光源室に設置された 30m ビームラインの全体図





表 6.3: X 線発生装置の仕様

最大定格出力	60 kV 200 mA (12 kW)
管電圧設定	$5 \sim 60 \mathrm{kV}$
管電流設定	$10\sim 200~{\rm mA}$
ターゲット回転数	$6000 \mathrm{rpm}$
X 線源サイズ	$0.5(Z) \times 10(Y) \text{ mm}^2$
実効焦点サイズ	$0.5(Z) \times 1.0(Y) \text{ mm}^2$
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから1時間後)



図 6.9: 四極スリットの構成図

大気室チェンバー

X線発生装置からのX線は、前述したように特性X線と制動放射による連続X線からなるが、X線の正反射及び散乱成分は強いエネルギー依存性を持っているために、測定にはできる限り単色なX線を用いる方が良い。このために大気室チェンバーには数種類のフィルタが入っており、目的とする特性X線以外のエネルギーの連続X線をフィルタで取り除くことによって単色化を行なっている。フィルタの構成を図6.10に示す。

透過型フィルタ

透過型フィルタは物質の吸収端における吸収係数の急激な変化を利用した、最も簡単な分光素 子である。各フィルタの K 吸収端が、目的とする特性 K-X 線のエネルギーのすぐ上に来てい ることを利用して、特性 X 線より高エネルギー側の連続 X 線を取り除くことができる。しかし 低エネルギー側の連続 X 線及び Kβ 線は除去することができない。

XRTの測定に用いられる特性 X 線とその時に使うフィルタの種類を表 6.4 に示す。また各フィルタの透過率を図 6.11 に示す。



図 6.10: 大気室チェンバー中のフィルタの配置図— X線発生装置側から検出器チェンバー側を見た時の様子 (上)、上 (+Z 方向) から見た様子 (下)。

特性 X 線	フィルタ物質	フィルタの厚さ [mum]
Al-K α (1.49keV)	Al	15
$\text{Ti-K}\alpha(4.51\text{keV})$	Ti	50
$\mathrm{Cu}\text{-}\mathrm{K}\alpha(8.04\mathrm{keV})$	Ni	40
Pt-L(9.44 keV)	Ni	40

表 6.4:特性 X 線と対応するフィルタの種類

Filter Transmissin



図 6.11: フィルタの透過率

試料室チェンバー、検出器チェンバー及び駆動ステージ

地上較正試験においては、平行度の高いX線ペンシルビームを望遠鏡全体に照射する必要があ る。しかし前述のX線発生装置は固定されているために、逆にXRTと検出器を並進及び回転 ステージに載せて移動することで、ペンシルビームによる全面スキャンを実現している。試料 室チェンバーと検出器チェンバーに設置されている、計10軸の駆動ステージ群の全体図及び可 動範囲について図 6.12と表 6.5 に示す。



図 6.12: 試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図 (柴田 1997) — 左が試料室チェンバー内 ステージ群で右が検出器チェンバー内ステージ群。

ペンシルビームを XRT に照射する位置を変えるために、試料室チェンバーのステージは Y、Z 軸方向に移動可能である。また XRT-I(焦点距離 4750[mm]) と XRT-S(焦点距離 4500[mm]) と いう焦点距離の異なる望遠鏡の測定のために、X 軸方向に関しても移動が可能である。さらに XRT の結像性能及び有効面積の入射角依存性を調べるために、X 線の入射角度を変える必要が あるので、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 方向に回転可能なステージが、並進ステージの上に載っている。これら 2 つのステージの組み合わせによって、任意の位置と角度に XRT を移動、回転させることがで きる。

また XRT の全面スキャンや1 ラインスキャンにおいては、検出器を XRT の焦点位置に固定す る必要があるため、検出器も X、Y、Z 軸方向に移動可能な並進ステージの上に載せてある。測 定の際には S-y と D-y を同期して動かさなくてはいけないが、±0.1mm 程度の精度で両者を一 致させて動かすことが可能になっている (柴田 1997)。これら 10 軸の駆動ステージ群は、試料室 チェンバーの X 軸を除いて全てワークステーションによって制御することが可能になっている。 座標軸は以下のように定義されている。X 線の上流 (X 線発生装置側)から下流 (検出器チェン バー側)方向に X 軸、地面から鉛直方向上向きに Z 軸を定義する。右手系を採用するために、Y 軸方向は上流から下流側を見て、水平方向に右から左に向かう向きになる。回転系については 右ねじが進む向きに回転させる方向を正の向きと定義する (図 6.12)。

表 6.5: 試料室・検出器両チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998) [?]

輔	1	移動量	移動可動範囲	移動速度
	[p	ulse/deg or min]	[mm, arcmin](total)	[mm, arcmin/sec]
S-2	X		0 or +25(手動)	
S-	Y 1	00 pulse / 1mm	$-206.5 \sim +426.6 \ (633.1)$	4
S-Z	Z 8	00 pulse / $1 \mathrm{mm}$	$-192.6 \sim +228.8 \ (421.4)$	0.25
S-6	$\theta_x = 10$	000 pulse / 1deg	(±360° 回転が可能)	20
S-6	$\theta_y = 20$	000 pulse / 1deg	$-331.8 \sim +292.9 \ (624.7)$	20
S-6	$\theta_z = 20$	000 pulse / 1deg	$-250.0 \sim +284.4 \ (534.4)$	20
検出器チェンバー				
=	軸	移動量	移動可動範囲	移動速度
		[pulse/mm]	[mm](total)	[mm/sec]
-	D-X	2000 pulse / 1m	nm $-111.5 \sim +97.3 \ (208.8)$	3) 1.5
	D-Y	2000 pulse / 1m	m $-231.0 \sim +429.7$ (660.	7) 4

D-Z 2000 pulse / 1mm $-207.5 \sim +213.0 (420.5)$

0.25

試料室チェンバー

真空装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されたビームラインの長さは、高い平行度を実現するために 36[m] にもおよぶ。しかし地上較正試験時に使用される X 線領域 (~10[keV]) では、大気中の分子による吸 収や散乱のために X 線は大気中をこれほどの距離を進むことができない。例えば 6[keV] の X 線の 平均自由行程は??[cm] でしかない。そこで X 線の進むダクトを真空に引いて、大気分子による吸収 を防いでいる。ビームライン全系に、ロータリーポンプとターボ分子ポンプの組が 9 組設置されて おり、ゲートバルブによって分けられた 6 つのエリアを真空に引く。ロータリーポンプは大気圧から ~ 10⁻¹[Torr] 程度までの低真空を粗引きし、10⁻¹[Torr] 以上の高真空では、ターボ分子ポンプと背圧 用補助ポンプとしてロータリーポンプを同時に使用して真空引きを行なっている。

これらの真空度はピラニゲージ (測定範囲: $7.6 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^{-3}$ [Torr]) と、イオンゲージ (測定範囲: $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ [Torr]) でモニターしており、通常大気圧 $\sim 10^{-3}$ [Torr] まではピラニゲージ、 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ [Torr] まではイオンゲージを使用している。

図 6.13 に宇宙研標準 X 線光源室に設置されている真空・排気装置の全体図を示す。

焦点面検出器

検出器チェンバーのステージには、焦点面検出器として以下のものが搭載されている。図 6.14 に 焦点面検出器の配置を示す。

 ガスフロー型比例計数管 (P.C.)
 宇宙研標準 X 線光源室で使われている比例計数管はガスフロー型であり、P10 ガス (Ar: 90%、 CH₄:10%)を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。
 表 6.6 に比例計数管の仕様をまとめる。

背面照射型 CCD カメラ

CCD とは Carge Coupled Device(電荷結合素子)の略であり、本来は電荷を移動させるためのデバ イスを意味する。現在宇宙研標準 X 線光源室には浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシス テムが設置されている。この CCD カメラは受光領域と電荷転送部が同じフルフレーム転送方式であ る。一辺 24µm の正方形ピクセル 1024×1024 個からなっていて、XRT に対して 19×19[arcmin²]の 立体角をカバーしている。CCD は 1.1[arcsec]の位置分解能をもった撮像能力があるために、サンプ ルのアラインメントやサンプルからの反射 X 線の Specular 位置を確認するのに使われる。また暗電 流を減らすために、ペルチェ素子を使って-70C°まで冷却して使用する。

図 6.15 に前面照射型と背面照射型 CCD の断面図及び電荷転送方式の概念図を示す。また表 6.7 に X 線 CCD カメラの仕様をまとめる。



図 6.13: ビームラインにおける真空・排気装置の全体図



図 6.14: 検出器チェンバー内に設置されている検出器 — 左 (+Dy 側) から順に CaZdTe 検出器、背面照射型 CCD、P.C.。

表 6.6: ガスフロー型比例計数管の仕様

使用ガス	P10 ガス (Ar:90%、CH ₄ :10%) 大気圧で使用	
ガス深さ	20 mm	
X 線入射窓	厚さ $1 \ \mu m$ ポリプロピレン $+$ カーボンダグ	
	直径 12.0 mm	
陽極芯線	直径 50 µm タングステン	
印化電圧	2100 V (C-Ka の場合のみ 2200 V)	
エネルギー範囲	$\sim 12.3 \text{ keV}$ (検出効率 10% 以上)	
エネルギー分解能	\sim 45% (Al:1.49keV)	
	\sim 30% (Al:4.51keV)	
	\sim 20% (Al:8.04keV)	
線形増幅器の増幅率設定	Al : 100 × 0.5, Ti : 50 × 0.5, Cu : 50 × 0.5	



図 6.15: 背面照射型 CCD カメラの原理 [?] — 前面照射型と背面照射型の断面図 (上)、電荷転送の概念図 (下)。

表 6.7: 背面照射型 CCD カメラの仕様

撮像素子	フルフレーム転送方式 MOS 型 CCD 固体撮像素子
有効画素数	$1024(H) \times 1024(V)$
画素サイズ	$24\mu\mathrm{m}$ $ imes$ $24\mu\mathrm{m}$
有効面積	24.6mm × 24.6 mm (1 inch size)
フレームレイト	2 秒/フレーム (高性能読み出しモード)
飽和電荷量	20000 electrons (高性能読み出しモード)
エネルギー範囲	$1.1 \sim 9.2 [{ m keV}]$
読み出しノイズ	
平均暗電流	
冷却方式	電子冷却 + 水冷

6.5 測定方法

宇宙科学研究所の 30 mm ビームラインでは、以下のような方法で X 線望遠鏡の性能を評価していく。

6.5.1 Quadrant 全面スキャン

宇宙研標準 X 線光源室では、X 線発生装置から約 30 [m] 下流に測定物(ASTRO-E XRT)を置く ことで平行度を確保している。さらに、XRTの上流約1 [m] にある4極スリットで X 線ビームを適 当な大きさに絞って平行度を確保し、さらに XRT と検出器の載った2つのステージを同時に移動(つ まり検出器を XRTの焦点面に固定)することで、X 線望遠鏡に一様で平行な X 線フォトンが入射し ている状態を疑似的に作る。

測定時は図 6.16 のような状態となる。実際の測定は以下の手順で行なうが、図 6.16、6.17 を参考 に手順を紹介する。



図 6.16: Quadrant の全面スキャン

X 線ビームの縦幅(スリット-Z 幅)を CCD では 2.0 [mm]、比例計数管では 4.0 [mm] にする。
 X 線ビーム幅を 2 [mm] とした場合、ビームの片側の広がりは約 20 [arcsec] 程度で、これは X 線望遠鏡の HPD の 1/7 程度であり十分と考えられる。

CCDでは 2.0×2.0 [mm²]、比例計数管では 4.0×1.0 [mm²] とする。基本的には測定条件が同じになるようにビームの面積を同じ(つまり比例計数管と CCD で同じフラックスになる)にしているが、PC では結像性能は測定できないので、Z 方向を広めにしても問題ないと考えてい



図 6.17: ラスタースキャン —(X 線ビームの相対位置を、Sy と Dy を動かすことで quadrant の開口部より 5 [mm] ほど外側に移動させる。この位置で検出器で測定を開始すると同時に、2 つのステージ Sy と Dy を同時に動かすことで X 線ビームを quadrant 開口部を横切らせ、さらにその 5 [mm] ほど外側まで移動させる。ここで、X 線ビームの縦幅だけ Sz と Dz を移動する。 以上の操作を quadrant 全面を走査するまで繰り返す。)

る。なお、図 6.17を見ても分かるように、スリット-Z が広い方がスキャンに掛かる時間が少な くてすむ。

- 2. Sy と Dy を動かすことで quadrant の開口部より 5 [mm] ほど外側に移動させる。この位置に おいて、検出器で測定を開始すると同時に、2 つのステージ Sy と Dy を同時に動かすことで X 線ビームは quadrant 開口部を横切り、さらにその 5 [mm] ほど外側まで移動させる。これは図 6.17 の横方向スキャンに対応する。Sy/Dy ステージの移動速度は $v_y = 4.0$ [mm/s] である。
- 3. 検出器での測定を終了し、X線ビームの縦幅だけ Sz/Dzを移動させる。
- 4. 上の 2、3を quadrant の反射鏡がはいっている部分を全て走査するまで繰り返す。

6.5.2 ポインティングスキャン

今回試作した X 線望遠鏡は 5 枚の反射鏡で構成されており、それらはアライメントプレートとゴ ムフィラ-による支持によって位置決めがなされている。その反射鏡の各位置での結像性能を測定す るために S-Y、S-Z 軸ステージ(図 6.12、表 6.5)のみを用いて、各反射鏡の各セクター間に図 6.18 に示すように 16 点ずつ 2mmx2mmの X 線ビームを当て、CCD で各点の望遠鏡焦点面での像を撮像 する。



図 6.18: ポインティングスキャン — 破線はアライメントプレートを表している。またセクターは左から時計まわ りに 1,2~6 と ID をつけた。

6.6 X線による望遠鏡性能評価

6.6.1 焦点距離

今回試作した望遠鏡の焦点距離は可視光測定の結果では設計値通りの 4750 mm 近傍になっていた。 それが正しい結果であるかを、X 線を用いて望遠鏡と検出器の距離を変えてその位置での像をとり、 可視光測定と同じ手法で焦点距離をもとめる。図 7.7 に各距離での像とその Peak 又は Cross Point を中心に上下の表面輝度をプロットし焦点距離を求めたものを示す。結果は表 6.8 に示すようになっ た。設計値通りの焦点距離となっていることがわかったので、今後の測定は望遠鏡と検出器の距離を を 4750 mm に固定して行っていく。

表 6.8: X 測定による焦点距離

	Peak による焦点距離 [mm]	Cross Point による焦点距離 [mm]
ゴムフィラ-による支持を行った X 線望遠鏡	4751	4751



図 6.19: X 線望遠鏡の焦点距離-左図:望遠鏡から検出器(CCD)の距離 4700mm での像、右図:距離 4730mm での像、左下図:距離 4750 mm での像、右下図:焦点距離(丸印が Peak、四角印が Cross Point による結果)

6.6.2 Quadrant 単位での結像性能測定結果

円柱形反射鏡を用いたもの、円錐形反射鏡でゴムフィラ-による支持を行っていないもののと行ったものの3つのコンフィギレーションにおける Quadrant 単位の結像性能の測定結果についてまとめる。それぞれに対して透過率最大の方向(光軸)において、入射X線として Ti-K(4.51kev)を使用しラスタースキャンを行う。図 6.20、6.21、6.22 に焦点画像と PSF、EEF をまとめた。

まず円柱形反射鏡を用いた望遠鏡では、結像性能が 3.28 分角となっている図 6.20。その原因として は、やはり円錐形反射鏡用に製作された望遠鏡ハウジングに円柱形反射鏡を組み込みゴムフィラーに より無理に基準面に押しけたことによる反射鏡表面形状の劣化によるものが主であると考えられる。 またこの当時は、レプリカ反射鏡の製作を開始した当初の反射鏡であるため、反射鏡単体での結像性 能が悪かったことも原因の一つであろう。

次に今回構築した反射鏡製作システム(第5章)を用いて製作した円錐形反射鏡を望遠鏡に組み込 んだ。まず、ゴムフィラーを用いず、アライメントプレートのスリットに反射鏡を入れただけの状態 での結像性能を測定したところ 4.0 分角という結果であった図 6.21。これは、可視光測定の結果から もわかっていたことだが、径のあっていない反射鏡をスリットに入れていることが原因で反射鏡がス リット内で遊んでしまっていることが主な原因であると考えられる。詳細な原因の究明は節 6.6.3 で 探っていく。

次にゴムフィラーを用いて反射鏡をスリット内の基準面に押し付けた場合の望遠鏡結像性能を測定 したところ 2.4 分角(図 6.22)を達成し、Astro-E の望遠鏡結像性能 2.1 分角 に迫る結果となった。 しかし、我々が目標としている1分角を切る望遠鏡には遠く及んでおらず、さらに詳細な X 線測定を 行い結像性能の劣化原因を探らねばならない。次の節 6.6.3 でその詳細な測定結果と結像性能劣化原 因について言及していく。

	HPD [arcmin]
円柱形反射鏡を用いた X 線望遠鏡	3.28 ± 0.04
ゴムフィラ-による支持を行っていない X 線望遠鏡	4.00 ± 0.04
ゴムフィラ-による支持を行った X 線望遠鏡	2.37 ± 0.04

表 6.9: X 測定による望遠鏡結像性能



図 6.20: 円柱形反射鏡を用いた X 線望遠鏡の焦点画像-上図:円柱形反射鏡を用いた場合の焦点画像、左下図: 上図の PSF、右下図:EEF



図 6.21: ゴムフィラ-による支持を行わない X 線望遠鏡の焦点画像-上図: 焦点画像、左下図: 上図の PSF、 右下図:EEF



図 6.22: ゴムフィラ-による支持を行った X 線望遠鏡の焦点画像-上図:焦点画像、左下図:上図の PSF、右下図:EEF

6.6.3 各反射鏡の結像性能

前節では、Quadrant全体での結像性能について調べたが、この節ではさらに詳細な測定として節 6.5.2 で述べたポインティングスキャンを円錐形反射鏡を用いた望遠鏡に対して行い、望遠鏡の性能 を左右する反射鏡表面形状と反射鏡の位置決定精度について評価していく。

反射鏡表面形状と位置決め誤差

この節では、ゴムフィラ-によって基準面に反射鏡を押し付けるという支持方式における反射鏡の 表面形状と反射鏡の位置決め精度について詳しく述べていく。

測定結果

今回行ったポインティングスキャンでは、ほぼすべての反射鏡面に X 線ビームを当てており、 その全てのデータ点(480点)をそのまま足し合わせれば Quadrant 単位の性能評価を行ったラ スタースキャンと同様のデータとなる。まず、各測定点で取得した集光像からその点での反射 鏡の HPD と結像中心の位置を求め、反射鏡毎にその結果をまとめた(図 6.23、6.24)。結像中 心の位置としては、集光像の重心の位置を採用しており、この重心のばらつきが反射鏡の位置 決め誤差量である。反射鏡毎の HPD の結果を見てみると、全体的にみてアライメントプレー ト近傍では HPD が大きな値となっている傾向があり、ゴムフィラ-によって押し付けることに より逆に形状が劣化している結果となっているようである。さらに、良くも悪くも反射鏡の形 状補正の効果が、反射鏡の方位角方向へ伝搬していないことも確認された。結像中心の位置は Foil 1、2、3 はどの点でも全体での結像中心から約2分角以内には入っているが、Foil 4、5 で は 3~4 分角にまで広がってしまっていた。さらに、セクター毎に同様に結像中心の位置のばら つきをまとめた(図 6.25)。その結果、真ん中のセクター3、4ではばらつきが少なく、端のセ クター 1、5 でのばらつきが 4 分角ほどになっていることがわかる。この原因として考えられる のは、4 つのスリットに径の合っていない反射鏡をいれてしまっていることと、鏡面の形状補 正効果が伝搬していなかったことと同様の要因でプレートとプレートの間の反射鏡が正しい位 置に固定できていないということであろう。


図 6.23: 各反射鏡の HPD -1 段目左: Foil 1、1 段目右: Foil 2、2 段目左: Foil 3、2 段目右: Foil 4、3 段目左: Foil 5、3 段目右: 全ての Foil



図 6.24: 各反射鏡の結像中心のばらつき-マークの違いはそれぞれセクターを表す。1 段目左: Foil 1、1 段目右: Foil 2、2 段目左: Foil 3、2 段目右: Foil 4、3 段目左: Foil 5、3 段目右: 全ての Foil



図 6.25: セクター毎の結像中心のばらつき-マークの違いはそれぞれ各 Foil を表す。1段目左: セクター 1、1段 目右: セクター 2、2段目左: セクター 3、2段目右: セクター 4、3段目左: セクター 5、3段目右: セクター 6

• 結像性能の成分の分離

節3.3 で述べた通り、望遠鏡の結像性能は反射鏡単体での表面形状と反射鏡の位置決め誤差の量の2成分からなっていると考えて良く、結像性能はこの2成分の2乗和で再現できる。そこで、ここではこの2成分を別々に見積もって、その2つが現状の望遠鏡結像性能にどのような割合で影響を与えているのかを見ていく。その手法としては前節でも述べたように、位置決め誤差の量は集光像の重心のばらつきから見積もられる量であるので、反射鏡単体での鏡面形状を知るには、ポインティングスキャンで得られた全ての集光像の重心を合わせて足し合わせてやればよい。実際にそのようにして見積もった各反射鏡単体のHPDと5組の反射鏡でのHPDを表7.6に示す、また位置決め誤差がまったく無い場合どのような集光像を結ぶのかということを示すと図6.27となりこの集光像から表7.6の結果を見積もっている。また、位置決め誤差の量は節6.2で説明したEEFと同様の考え方により、全体での結像中心からデータ点全体の半分(240点)の結像中心がはいるところをHPDであると換算する、結果は表7.7、図7.15に示す。

これらの結果を Astro-E での結果と比較すると、位置決め誤差に関しては 1.7[分角] から 1.1[分角] へと大きく向上しているが、我々が目指す結像性能 30 秒角の望遠鏡のためには位置決め誤差を最低 23 秒角におさえる必要があり、まだまだ改善が必要である。表面形状に関しては Astro-E では約 1.3[分 角] であるのに対し、今回の円錐形反射鏡を用いた望遠鏡では 2.1[分角] となってしまっている。よっ て、今回の望遠鏡の結像性能が 2.3 [分角] と Astro-E と同程度の結果となっていしまっていた原因は、 その多くが反射鏡の表面形状誤差によるものである。この鏡面形状誤差が大きくなっている原因とし て考えられるのは、レプリカ法による反射鏡製作に我々がまだ習熟しきれてないということと、ゴム フィラーで支持したことにより反射鏡の形状を補正できておらず逆に歪めてしまっている可能性も考 えられる。次節で、支持の有無によって反射鏡の表面形状がどのように変化したのかについて詳しく 探り、改善策を考えていく。

	位置決め誤差 (HPD 換算) [分角]
望遠鏡全体	1.14 ± 0.04

表 6.10: 反射鏡位置決め誤差(HPD 換算)

	Foil1	Foil2	Foil3	Foil4	Foil5	all-Foil
反射鏡全体	2.45 ± 0.04	2.31 ± 0.04	2.21 ± 0.04	1.27 ± 0.04	2.24 ± 0.04	2.07 ± 0.04
プレート近傍	2.52 ± 0.04	2.83 ± 0.04	2.21 ± 0.04	1.96 ± 0.04	2.90 ± 0.04	2.48 ± 0.04
プレート間	2.45 ± 0.04	2.28 ± 0.04	2.21 ± 0.04	1.23 ± 0.04	2.21 ± 0.04	2.03 ± 0.04

表 6.11: 各反射鏡単体での HPD [分角]



図 6.26: 反射鏡位置決め誤差--左図: 望遠鏡全体での結像中心のばらつき、右図: EEF

ゴムフィラー支持の有無による結像性能の違い

次に、節 6.6.2 でゴムフィラー支持の有無によって望遠鏡結像性能が大きく異なっていたことの原 因と、反射鏡の形状をどれ程劣化させているのかについて調べていく。支持をしていない場合には、 ポインティングスキャンを Foil 2、3、4、5 のセクター 3、4、5 のみでしか行っていないので、支持の 有無による違いを探るために支持した場合のデータはこれと対応したポインティングスキャンのデー タを抜粋して比較していく。

まず、それぞれの反射鏡単体での HPD を縦軸に、反射鏡の方位角方向を横軸にとった結果を図 6.28 に示す。図からわかるように、明らかに支持をおこなった場合にゴムフィラーを挿入しているほとん どのプレート近傍の鏡面形状が劣化している。これは、ゴムフィラーを用いてプレートの基準面に 反射鏡を押し付けるさいの定量的な押し付け方法を確立出来ておらず、反射鏡の形状補正に必要な 3[g/cm] という荷重以上に力が加わってしまっていることと、反射鏡の母線方向に関しても荷重の掛 かり方が不均一となってしまっていることが原因である。表 6.12 にポインティングスキャンで得られ た各点での集光像の重心を足し合わせて反射鏡単体での結像性能を見積もった結果をまとめる。結果 としてはプレート間での結像性能はほぼ同程度ながら、プレート近傍での表面形状劣化に伴う結像性 能の劣化により、全ての反射鏡の HPD が支持したことにより 0.1~0.7[分角] ほど劣化してしまってい る。この結果は本論文の目的とは逆の結果となってしまっている。これを改善する試みについては、 第7章まとめる。

次に、支持の有無による望遠鏡結像性能の違いの原因であるが、反射鏡単体での結像性能の評価の 結果、支持をしていない場合の方が反射鏡自体の結像性能は優れている結果となっていた。そのため、 支持していない場合に望遠鏡の結像性能が4[分角]と非常に悪い結果となった原因は、反射鏡の位置 決め誤差によるものであるはずである。図6.29に支持の有無による結像中心のばらつきの違いを示 す。図から、明らかにゴムフィラーによる支持によって結像中心のばらつきがおさまっているのがわ かる。しかし、支持無しの場合のデータ点が少ないため、前述したような位置決め誤差を測定データ から HPD へ換算する手法は適当ではない。よって望遠鏡の結像性能が2つの成分の2乗和の平方根



図 6.27: 反射鏡の結像中心を重ねた場合の X 線望遠鏡の焦点画像-上図:焦点画像、左下図:上図の PSF、右下図:EEF

であることから、位置決め誤差を見積もった(表 6.13)。その結果、位置決め誤差に関しては支持の 前後で 3.7 [分角] から 1.1[分角] へと大幅な向上をしていることを確認した。結論としては、ゴムフィ ラーで支持することによる効果としては

1. 反射鏡の位置決め誤差は 3.7 [分角] から 1.1 [分角] へと大幅な向上

2. 反射鏡の形状誤差は反射鏡4枚については1.48 [分角] から 1.83 [分角] へと低下

となっている。結像性能を劣化させてしまう原因となった2については7章で改善を試みる。

Foil ID	支持を行っていない反射鏡の平均 HPD [分角]	支持した反射鏡の平均 HPD [分角]
Foil 2	1.55 ± 0.04	2.24 ± 0.04
Foil 3	1.44 ± 0.04	1.89 ± 0.04
Foil 4	0.99 ± 0.04	1.20 ± 0.04
Foil 5	2.14 ± 0.04	2.17 ± 0.04
Foil 2-5	1.48 ± 0.04	1.83 ± 0.04

表	6.12:	X測定によ	るセクター:	3、4、	5での各反射鏡の平均 HPD
---	-------	-------	--------	------	----------------

	位置決め誤差 (HPD 換算) [分角]
望遠鏡全体	3.72 ± 0.04

表 6.13: 支持を行わない場合の反射鏡位置決め誤差(HPD 換算)



図 6.28: 各反射鏡の支持の有無による HPD の比較 - 丸印がゴムフィラーによって基準面に押し付けた場合の反 射鏡の各点での HPD、三角印がゴムフィラ-無しの場合の各点での HPD、破線はアライメントプレートを表している。左 上図: Foil2、右上図: Foil3、左下図: Foil4、右下図: Foil 5



図 6.29: 支持の有無による各反射鏡の結像中心のばらつき-マークの違いは丸印が支持を行った場合、三角印 が支持を行わなかった場合の結果である。1段目左: Foil 2、1段目右: Foil 3、2段目左: Foil 4、2段目右: Foil 5

第7章 150µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡の光学 測定

7.1 測定目的

第6章では、ゴムフィラーによる支持方式を用いた X 線望遠鏡の測定結果について述べた。その結 果は、この方式は反射鏡にかかっている荷重を定量的にコントロールすることが難しく、しかも支持 している個所の近傍で反射鏡の鏡面形状を歪めてしまっていた。さらに、反射鏡の剛性が小さいこと が原因で、方位角方向への補正効果の伝搬が起っていないことが確認された。そこで、我々はまず反 射鏡の剛性をあげるため、基板を厚さ 120µm のものから Astro-E2 と同様の厚さ 150µm の基板 (材質 は同じ 1050-H18 材の純アルミ) へと変更し反射鏡を製作した(第5章参照)。次に、反射鏡を基準面 に押し付ける際にかける荷重に定量性をもたせるため、図7.1 に示すような、2枚1組のプレートを 13 組用意し、1枚はこれまでと同様に反射鏡を押し付ける基準面として固定し、もう1枚をスライ ドさせ反射鏡の背面から基準面に押し付ける支持方式を考案した。この方式の採用により、押し込む 側のプレートをマイクロメータ等でコントロールすることにより、原理的には定量的に反射鏡に荷重 をかけていくことが可能となった。さらに復数枚の反射鏡を同時に同じ力で押し付けることが出来、 将来的には 100枚以上の反射鏡を積層することが想定される望遠鏡においても利用することができる ため、望遠鏡製作の観点からも現実味をおびた手法であるといえる。さらに、2003年の早川修論の 結果から反射鏡に均一な荷重を加えるためには、弾性体物質によって支持しなければならないという 結果から、今回は弾性体物質として厚さ 50µm のニトフロンシートを採用した。

この章では、これらの変更点

1. 反射鏡の基板の厚さを 150µm へ

- 2. 基準面となるアライメントプレートを 13 枚へ(図 7.2)
- 3.2枚のプレートによる挟み込み支持方式へ

による X線望遠鏡の結像性能の改善についてまとめる。

7.2 レーザー変位計による反射鏡方位角方向への補正効果の伝搬の評価

この節では、厚さ 120µm のものから Astro-E2 と同様の厚さ 150µm の基板へと変更し反射鏡を製作したことにより、実際に補正効果が伝搬するかを正反射型のレーザー変位計(節 4.2.2)を用いて評価していく。評価方法としては、第5章のアルミ基板や反射鏡の表面形状評価と同様に表面形状を





図 7.1: 2組のアライメントプレートとニトフロンシートを用いた新望遠鏡---左図: 実際の写真、右図: 2組 のプレートを用いた支持方式の略図



図 7.2: 150µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡 Quadrant の設計略図

レーザー変位計で測定し、支持の前後での HPD の変化をみていく。しかし、実際に望遠鏡に組み込 んだ状態ではレーザー変位計を用いて形状を測定することができないため、今回用いるアライメント プレートと同様のスリット加工がなされたテストプレートを用いて擬似的に 2 枚のプレートで挟み込 んだ状態をつくりプレートとプレートの中間点 (図 7.3) について測定を行った。Foil ID R71-11、16 の反射鏡を用いた形状測定の結果を図 7.4 に、支持の有無による法線揺らぎの変化を表 7.1 に示す。 測定結果から、レプリカ反射鏡を製作する過程で生じる、ガラスマンドレル自体がもつうねりに起因 する大局的な構造は十分に補正できていることが確認できた。法線揺らぎの結果からも、補正効果が プレート間にも伝搬していることが実証された。しかし、ガラスマンドレルの傷やレプリカ時に混入 するごみ等が原因と考えられる局所的な構造はやはり補正できていない。このような局所的な形状は レプリカ反射鏡の製作に習熟し、製作の段階で改善していくべきである。

表 7.1: 支持の有無による反射鏡の法線揺らぎの向上

Foil ID	支持を行っていない反射鏡の法線揺らぎ [秒角]	支持した 反射鏡の法線揺らぎ [秒角]
R71p-11	52	32
R71p-16	52	20



図 7.3: 補正効果の測定

7.3 可視光測定

第6章での可視光測定と同様の測定を行い、組み上げた望遠鏡(以下挟み込み支持望遠鏡)のおお まかな性能を評価する。

7.3.1 焦点距離

まず、挟み込み支持望遠鏡が設計値通りの焦点距離となっているかを測定していく。詳しい測定法 については節 6.3.1を参照。測定結果を表 7.2、図 7.5 に示す。焦点距離 4745~4754 mm とおよそ設 計値通りになっている。



図 7.4: 反射鏡方位角方向への補正効果の伝搬 - 黒線が補正前、赤線が補正後の表面形状を表す。左図: R71p-11、 右図: R71p-16

	Peak による焦点距離 [mm]	Cross Point による焦点距離 [mm]
挟み込み支持望遠鏡	4745	4754

表 7.2: 可視光測定による焦点距離



図 7.5: 可視光測定による焦点距離測定結果

7.3.2 結像性能

ここでは可視光測定における挟み込み支持望遠鏡の結像性能をまとめる。測定結果と HPD の値を それぞれ図 7.6、表 7.3 に示す。結果としては、挟み込み支持望遠鏡の可視光測定による結像性能は 1.3 分角となっており、ゴムフィラ-により支持した場合の望遠鏡(1.3 分角)と同じ値となっている。 しかしこれは前でも述べたように、すでに回折限界に達していることが原因であり、結像性能が向上 していないということではない。望遠鏡の性能向上により、可視光測定による結像性能の評価はもは や限界にきていて、結像性能評価には X 線測定のみを用いるしかない。

表 7.3: 可視光測定による HPD 測定結果



図 7.6: X 線望遠鏡の焦点画像--左図:焦点面での集光像、右図: EEF

7.4 X線測定による望遠鏡性能評価

7.4.1 焦点距離

今回も試作した挟み込み支持望遠鏡の焦点距離は可視光測定の結果では設計値通りの 4750 mm 近 傍になっていた。それが正しい結果であるかを、X 線を用いて望遠鏡と検出器の距離を変えてその位 置での像をとり可視光測定と同じ手法で焦点距離をもとめる。図 7.7 に各距離での像とその Peak 又 は Cross Point を中心に上下の表面輝度をプロットし焦点距離を求めたものを示す。結果は表 7.4 に 示すようになった。設計値よりも 10~25 [mm] 程度焦点距離が長くなってしまっているが、この程度 では望遠鏡の結像性能にほぼ影響をおよぼさないことと、望遠鏡と検出器の距離を 4750mm 以上と ることができない測定環境のため距離は 4750 mm に固定して測定を行っていく。



表 7.4: X 測定による焦点距離

図 7.7: X 線望遠鏡の焦点距離-左図:望遠鏡から検出器(CCD)の距離 4700mm での像、右図:距離 4725mm での 像、左下図:距離 4750 mm での像、右下図:焦点距離(丸印が Peak、四角印が Cross Point による結果)

第7章 150µm 反射鏡を用いた X 線望遠鏡の光学測定

7.4.2 Quadrant 単位での結像性能測定結果

ここでは、今回試作した挟み込み支持望遠鏡と、比較対象として現在宇宙科学研究所で性能評価を 行っている Astro-E2に搭載される X 線望遠鏡内の 1 つである T2 の 1 つの Quadrant(Q1) について の結像性能測定結果についてまとめる。それぞれに対して節 6.6.2 と同様に透過率最大の方向(光軸) において、入射 X 線として Ti-K(4.51kev)を使用しラスタースキャンを行う。図 7.8、7.9、に T2-Q1 と挟み込み支持望遠鏡の焦点画像と PSF、EEF をまとめた。

まず、比較対象とした T2-Q1 は結像性能が 1.93 分角 (表 7.5、図 7.8) となっており、Astro-E2 の X 線望遠鏡の結像性能の公称値 1.9 分角と同程度であり、Astro-E2 に搭載される X 線望遠鏡として 典型的なものであると言える。

我々の試作した挟み込み支持望遠鏡の結像性能は 1.60 分角 (表 7.5、図 7.9) となり、Astro-E2 に搭載される X 線望遠鏡を凌ぐ性能を達成した。しかし、我々が目標とした 1 分角を切る望遠鏡には及んでおらず、第6章と同様に詳細な X 線測定を行い結像性能の劣化原因を探らねばならない。次の節7.4.3 でその詳細な測定結果と結像性能劣化原因について言及していく。

表 7.5: X 測定による望遠鏡結像性能

	HPD [arcmin]
Astro-E2-T2-Q1	1.93 ± 0.04
挟み込み支持望遠鏡	1.60 ± 0.04



図 7.8: Astro-E2-T2-Q1の焦点画像-上図:焦点画像、左下図:上図の PSF、右下図:EEF



図 7.9: 挟み込み支持望遠鏡の焦点画像-上図:焦点画像、左下図:上図の PSF、右下図:EEF

7.4.3 各反射鏡の結像性能

反射鏡表面形状と位置決め誤差

この節では、2枚1組のプレートによって基準面に反射鏡を押し付けるという支持方式における反 射鏡の表面形状と反射鏡の位置決め精度について詳しく述べていく。ポインティングスキャンに関し ては、アライメントプレートを増やしたことにより、測定点を図7.10のように変更した。測定点は 全部で300点となっている。



図 7.10: ポインティングスキャン — 破線はアライメントプレートを表している。またセクターは左から時計まわ りに 1,2~12 と ID をつけた。

• 測定結果

まずポインティングスキャンの測定結果として、各測定点で取得した集光像からその点での反 射鏡の HPD を見積もった結果を図 7.11 に、結像中心位置のばらつきを図 7.12 に示す。各測定 点での反射鏡の HPD を前章の図 6.23 と比較してみると、アライメントプレート近傍で前回の 様に反射鏡の表面形状を大きく歪めてしまっていることはなさそうである。Foil 5 のみ非常に 形状の悪い反射鏡となっていて、これはエポキシの噴霧時に反射鏡に厚さむらが生じ、Foil 5 の みに荷重がかかりすぎてしまい全体を歪めてしまった可能性もある。結像中心位置のばらつき を図 6.24 と比較すると、ゴムフィラーによる支持の場合すべての反射鏡で 2~5 分角もばらつい ているのに対し、挟み込み支持望遠鏡では Foil5 を除き全ての反射鏡が 1 分角以内にばらつきが おさまっている。また、セクター毎にまとめた結像中心のばらつきの結果を図 7.13 に示す。こ の結果は図 6.25 との比較のため、2 つのセクター毎にまとめてある。この結果からも Foil5 を 除けば、すべてのセクターでばらつきは1分角以内におさまっている。これは、反射鏡の剛性 をあげたことと、アライメントプレートの数を増やしたことにより、反射鏡の方位角方向へ補 正効果を伝搬させることができたからだと考えられ、ゴムフィラーを用いた望遠鏡からの1つ の大きな改善点である。



図 7.11: 各反射鏡の HPD -1 段目左: Foil 1、1 段目右: Foil 2、2 段目左: Foil 3、2 段目右: Foil 4、3 段目左: Foil 5、3 段目右: 全ての Foil



図 7.12: 各反射鏡の結像中心のばらつき-マークの違いはそれぞれセクターを表す。1 段目左: Foil 1、1 段目右: Foil 2、2 段目左: Foil 3、2 段目右: Foil 4、3 段目左: Foil 5、3 段目右: 全ての Foil



図 7.13: セクター毎の結像中心のばらつき-マークの違いはそれぞれ各 Foil を表す。1 段目左: セクター1と2、1 段目右: セクター3と4、2 段目左: セクター5と6、2 段目右: セクター7と8、3 段目左: セクター9と10、3 段目右: セクター11と12

• 結像性能の成分の分離

ゴムフィラーによる支持からプレートによる挟み込み支持に変えたことと、反射鏡の基板の変更に よって実際に望遠鏡の結像性能を向上させることができた。ここでは、その性能向上の要因をさらに 定量的に表すため、表面形状誤差と位置決め誤差を分離して比較していく。まず、ポインティングス キャンで得られた全 300 点の集光像をそれぞれの重心が重なるように足し合わせた(図7.14)。その 結果得られた各反射鏡単体の HPD と 5 組の反射鏡での HPD を表 7.6 に示す。また、位置決め誤差の 量は、全体での結像中心からデータ点全体の半分(150点)の結像中心がはいるところを HPD であ ると換算する。結果は表 7.7、図7.15 に示す。

位置決め誤差はゴムフィラーによる支持の時の 1.1 分角から 0.62 分角(37 秒角)へと向上し、結 像性能 30 秒角の望遠鏡に必要な位置決め誤差 23 秒角へ迫る性能を達成できた。一方で表面形状誤差 に関しては、1.5 分角とゴムフィラーによる支持の時の 2.1 分角からは向上させることができたが、未 だ Astro-E2 の 0.83 分角におよばなかった。原因は、表 7.6 でみてとれるように、今回もプレート近 傍でわずかだが形状を歪めてしまっていたことと、Foil5 が非常に形状の悪い反射鏡であったためで ある。

	Foil1	Foil2	Foil3	Foil4	Foil5	all-Foil
反射鏡全体	$1.68 \pm \ 0.04$	$1.30 \pm \ 0.04$	1.23 ± 0.04	$1.20{\pm}~0.04$	2.38 ± 0.04	1.48 ± 0.04
プレート近傍	$1.86 \pm \ 0.04$	1.41 ± 0.04	1.48 ± 0.04	1.23 ± 0.04	2.31 ± 0.04	$1.62{\pm}~0.04$
プレート間	1.62 ± 0.04	1.27 ± 0.04	1.13 ± 0.04	$1.16 \pm \ 0.04$	2.41 ± 0.04	$1.44{\pm}~0.04$

表 7.6: 各反射鏡単体での HPD[分角]

	位置決め誤差 (HPD 換算) [分角]
望遠鏡全体	0.62 ± 0.04

表 7.7:反射鏡位置決め誤差(HPD 換算)



図 7.14: 反射鏡の結像中心を重ねた場合の X 線望遠鏡の焦点画像-上図:焦点画像、左下図:上図の PSF、右下図:EEF



図 7.15: 反射鏡位置決め誤差--左図:望遠鏡全体での結像中心のばらつき、右図: EEF

第8章 まとめと今後の課題

8.1 まとめ

本論文では、多層薄板型 X 線望遠鏡の高角度分解能化を目指しさまざまな研究を行った。ここでは、本研究で得られた成果をまとめる。

レプリカ法による反射鏡製作システムの構築とその習熟

レプリカ法により円錐形の反射鏡を製作するシステムを新たに構築した。反射鏡の製作は基板の製 作、反射膜の成膜、エポキシ噴霧、圧着及び剥離の4工程からなっており、いずれの工程も緻密で精 度のよい作業が要求されるため、数多くの反射鏡を製作しその作業に習熟していかなければならな かった。本論文では、実際に100枚以上の反射鏡を製作しており、現状でも単体ではAstro-E2に搭 載される反射鏡と鏡面粗さや鏡面形状に関して同程度の性能をもつ反射鏡を製作できるまでに至って いる。

厚さ120µm 反射鏡を用いたゴムフィラー支持を採用した望遠鏡の試作

2002年伊藤修論、2003年早川修論の反射鏡の形状補正効果の実証と基準面となるアライメントプレートへの負担を考慮し、厚さ120µmの反射鏡を用いたゴムフィラーによる連続体支持を採用し、多重薄板型望遠鏡の結像性能低下の主要因である表面形状誤差と位置決め誤差を同時に補正し、高い角分解能と開口効率を同時に実現することを目指した望遠鏡を組み上げた。その結果、位置決め誤差はAstro-Eの1.7分角から1.1分角へと向上させることに成功した。しかし、ゴムフィラーによる反射鏡支持方式は定量性に乏しく反射鏡に不必要なストレスを加え、反射鏡の表面形状は逆に劣化してしまった。さらに、反射鏡自体の剛性の低さから方位角方向への補正効果の伝搬がおこらず、結果として望遠鏡の結像性能は2.3分角とAstro-E(2.1分角)と同程度の結果となった。

厚さ 150µm 反射鏡を用いた 2 枚のプレートによる挟み込み支持を採用した望遠鏡の試作 ゴムフィラー支持を採用した望遠鏡の測定結果から明らかとなった問題点に対し、支持方式に 2 枚 のプレートによってすべての反射鏡を同時に挟み込む手法を取り入れ反射鏡にかける荷重に定量性を もたせた。また、方位角方向への補正効果の伝搬に関してはプレートの数を増やしたことと反射鏡の 剛性をあげるためアルミ基板の厚さを 150µm とすることで改善を目指した。その結果、反射鏡表面 形状誤差は 1.5 分角、位置決め誤差に関しては 37 秒角を達成することができ、望遠鏡結像性能では Astro-E2 の 1.9 分角を凌ぐ 1.6 分角を達成した。表 8.1 に Astro-E2 と今回我々が製作した望遠鏡の 結像性能の結果をまとめる。

	表面形状誤差 [分角]	位置決め誤差 [分角]	望遠鏡結像性能 [分角]
Astro-E2	0.83 ± 0.04	1.70 ± 0.04	1.90 ± 0.04
ゴムフィラ-支持望遠鏡	2.07 ± 0.04	1.14 ± 0.04	2.37 ± 0.04
挟み込み支持望遠鏡	1.48 ± 0.04	0.62 ± 0.04	1.60 ± 0.04

表 8.1: Astro-E2 と我々が製作した望遠鏡結像性能の比較

8.2 今後の課題

反射鏡製作方法の習熟

本論文では、反射鏡を100枚以上製作し、Astro-E2と同程度の反射鏡を製作することに成 功した。しかし、未だ全ての反射鏡がガラスマンドレルの形状を写しとれているわけではな く、全ての反射鏡製作工程においてまだまだ最適化すべき点がある。さらに、今回試みた2 枚のプレートによる挟み込み支持方式を今後も続けるとすると、反射鏡の厚さを1µmの精 度で均一に仕上げなければ、節7.4.3 での Foil 5 の様に形状を大きく歪めてしまう可能性が ある。そこで今後は特に、接着用エポキシの噴霧量のコントロールと剥離方法について研究 を重ね、厚さが均一で性能の安定した反射鏡製作を目指していかねばならない。

支持方式の確立

本論文中では、反射鏡を精度よく加工された基準面に押し付けて、表面形状誤差と位置決 め誤差を同時に補正しようという考えのもと、ゴムフィラーによる支持と2枚のプレートに よる挟み込み支持の2つについて、その補正効果を研究した。その結果、望遠鏡に組み込ん だ際には、2つの方式とも位置決め誤差の向上は達成することができているが、表面形状誤 差については程度の差はあれ2つの方式どちらも形状誤差は劣化していた。よって今後は、 表面形状誤差の補正に重点を置いた支持方式を検討していく必要がある。具体的な手法とし ては、現在この様な反射鏡に歪みが生じる原因として、プレートの溝内の基準面が荒れてい ることが考えられ、それを解消するために基準面に何らかのコーティングを施すか、ピーニ ング等の研磨処理を行うことを考えている。

次世代 X線望遠鏡へ向けて

本研究で分かった今回の支持方式による結像性能の評価から、次世代X線望遠鏡へ向けて の指針を探る。次世代X線望遠鏡で我々が目指す結像性能は HPD で 30 秒角である。

1. 反射鏡表面形状誤差の改善

本論文で試作した2枚のプレートによる挟み込み支持方式望遠鏡では、我々が目指す

次世代X線望遠鏡に要求される反射鏡位置決め誤差(23秒角)にせまる37秒角を達成した。そこで今や望遠鏡結像性能のうち最も大きなものとなった反射鏡表面形状誤差の改善が一番優先されるべき課題である。2002年伊藤修論、2003年早川修論、本論文でともに反射鏡の表面形状の改善を試み、反射鏡単体での改善は実証されているが、望遠鏡に組み込んだ場合には形状を改善させることができなかった。この同じ支持方式を用いているにも関わらず、反射鏡単体の場合と望遠鏡に組み込んだ場合で異なる結果となってしまう原因を優先的に探る必要がある。

2. 反射鏡位置決め誤差の改善に特化した望遠鏡ハウジングの製作

本論文で試作した上下段一体型のアライメントプレートと背面からスリットの内壁に 反射鏡を押し付ける可動式のプレートによって、反射鏡の位置決め精度は飛躍的に向 上させることが出来た。そこで、一歩後退した形となるが、反射鏡の表面形状誤差は反 射鏡製作を習熟しその過程で形状誤差が HPD で 30 秒角以下となるように改善してい き、望遠鏡組み込み後に求める補正効果を反射鏡位置決め誤差の改善に絞る。そのた めの1つの方法としては、基準面を本論文のようなプレートに作ったスリットの内壁か ら、鏡面形状に影響の少ない Astro-E 型のアライメントバーの溝内の基準点に変更し、 このアライメントバーを上下一体で製作し背面から今回のように可動式のバーで反射 鏡の端の部分を基準点に押し付ける方法が考えられる。この様な手法で位置決め誤差 を 10 秒角以内に抑えることを目指せば、目標とする望遠鏡結像性能には反射鏡の表面 形状が HPD で 28 秒角までは許容できる。

謝辞

本論文は多くの方々による御指導・御協力によって完成させることができました。全ての 方々に感謝します。

指導教官である石田学先生には、X線望遠鏡全般や実験に関することからレポートや論文 の構成まで本研究全般にわたり御指導をいただきました。残念ながら就職してしまうため、 もう御指導を受けることはできませんが、この2年間で学んだことをいかし、立派な社会人 を目指します。本当にありがとうございました。

大橋隆哉先生には、天文学のさまざまなことを教えて頂きました。もう先生のブラック ジョーク?が聞けないと思うと残念でなりません。今振り返ると大橋研は本当にすばらしい 研究室だと思います、大橋研の一員にさせて頂きありがとうございました。石崎欣尚さんに は、パソコン関連から実験まで色々助言を頂きました。研究室のスタッフの皆様には本当に 感謝しています。

國枝秀世先生には、X線望遠鏡について教えて頂くとともに、他の実験に関しても数多く の助言を頂き感謝しております。さらに、就職に関しても相談にのって頂きありがとうござ いました。XRTチーム万歳!前田和良さんには、実験で行き詰まっているときに鋭い指摘や 助言を頂き本当に助けて頂きました。見崎一民さんには物理の基礎から御指導頂き非常に勉 強になりました。共に研究に取り組み、素敵な日々を過ごした伊藤啓さんには、多くの助言 を頂くとともに、D論の準備でお忙しい中、夜遅くまで実験に協力して頂きました。D論が んばってください。早川彰さん(大将)には手取り足取り一から色々教えて頂き感謝してま す。昼は良き先輩でした、夜はお互い気をつけましょう。大将のおかげで、楽しい宇宙研生 活を送ることができました。清水智央君には、実験を手伝ってもらい助かりました。会社で は失敗しないように気をつけてください。幅良統さん、森英之さんには測定法や解析方法に ついての相談に乗って頂き感謝しております。飯塚亮さんは、宇宙研でのパソコン関係の師 匠として、色々御指導を受けました。同期の伊藤昭治君、内藤聖貴君とは実験に関して様々 な議論やぐちを言えて、よい刺激となりました。井上裕彦君、岡田俊策君、横山裕士君から は色々な発言が聞けておもしろかったです。来年は頑張ってください。

都立大の先輩である石川輝さん、篠崎慶亮さん、森田うめよさんにはゼミなどの際に天文 学の基礎知識を教えて頂いたり、たわいもない話に付き合って頂いたりと実験の息抜きに付 き合って頂きありがとうございました。同期の佐藤浩介君とは、大学4年から予想以上の長 い付き合いとなりました。実験について夜な夜な語り合ったり、アルコールで身を清めたり と素敵な2年間を送れたのも佐藤のおかげです。都立大を選んで正解でした。この先さらに 長い付き合いとなるかもしれませんが、よろしく。古賀丈雄君、社会に出てもともにがんば りましょう。林篤志君、高井基充君も頑張ってください。皆様ありがとうごさいました。 最後に経済的、精神的に支えてくれた両親と友人達に感謝。

関連図書

- [1] Korsch, D. Reflective Optics. Academic Press, 1991,
- [2] von H.Wolter. Spieelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optikenfür Röntgenstrahlen. Annalen der Physik, Vol. 10, pp. 94-114, 1952,
- [3] Church, E. L. & Takacs, P. Z. Statistical and signal processing concepts in surface metrology. SPIE, Vol.645, p.107, 1986,
- [4] Kunieda, H., Hayakawa et al. Roughness mesurement of x-ray mirror surfaces. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 (ISSN 0021-4922), vol. 25, Sept. 1986, p. 1292-1299., 25, 1292,
- [5] Sinha, S. K. et al. X-ray and neutron scattering from rough surfaces, 1988, prb, 38, 2297,
- [6] 波岡武,山下広順. X 線結像光学. 培風館, 1999,
- [7] S.P.Timoshenko. 板とシェルの理論 (上・下). 丸善, 1973,
- [8] 日高康弘. X 線望遠鏡の結像性能の評価とその高性能化への展望. Master's thesis, 名古 屋大学, 2000,
- [9] 伊藤啓. X 線望遠鏡結像性能向上の研究. Master's thesis, 東京工業大学, 2002,
- [10] 加藤正磨. 直接レプリカ多層膜スーパーミラー反射鏡の製作と光学特性評価. Master's thesis, 名古屋大学, 2002,
- [11] 早川彰. 高角度分解能多重薄板型 X 線望遠鏡の開発. Master's thesis, 東京都立大学, 2003,
- [12] 森久泰二郎. 硬 X 線用多層膜反射鏡の開発. Master's thesis, 東京工業大学, 2003,